

JAERI-Tech

99-025



JP9950152



## ブランケット加熱試験設備の概要と性能試験

1999年3月

古谷一幸・原 重充\*・黒田敏公・榎枝幹男  
佐藤 聰・秦野歳久・高津英幸・小原祥裕

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

---

編集兼発行 日本原子力研究所

## ブランケット加熱試験設備の概要と性能試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

古谷 一幸・原 重充\*・黒田 敏公・榎枝 幹男  
佐藤 聰・秦野 歳久・高津 英幸+・小原 祥裕

(1999年2月3日受理)

国際熱核融合実験炉 ( International Thermonuclear Experimental Reactor ; ITER ) の炉内に装荷されるブランケット・モジュールの繰り返し熱負荷に対する除熱特性、構造健全性等の評価・実証を目的とした加熱試験設備の設計・製作を行った。ブランケット・モジュール表面への熱流束 ( 実機表面への平均熱流束 : 約  $0.25 \text{ MW/m}^2$  ) の模擬には、比較的大きな面積をほぼ均一に加熱することを考慮して赤外線加熱方式を採用した。赤外線ヒータは真空雰囲気中 ( $10^{-4}$  Torr ~) で使用するため、ランプ石英管強度の極度の低下を防止する観点からランプを石英製の保護管内に納め、ランプと保護管の間の環状部分に空気を流すことでランプ石英管を冷却している。真空バウンダリは保護管外面とし、エラストマ系の耐熱 O リング ( 耐熱温度  $300^\circ\text{C}$  ) を使用すると共に、O リングが過熱されないよう保護管内面に熱反射コーティング ( 金コーティング ) を施し、かつ、シール部形状と冷却空気の流路を工夫した。本設備の性能確認試験のために、表面黒化処理を施した遮蔽ブランケット小規模モジュールを被加熱試験体として用いた赤外線ヒータの定格運転及びサイクル運転を行い、以下の主要な結果及び結論を得た。

- (1) カロリメータより測定した試験体表面での熱流束は  $\sim 0.2 \text{ MW/m}^2$  であった。
- (2) 温度解析結果と実測値との比較から、小規模モジュールの除熱特性は良好であることが明かとなった。
- (3) 赤外線ヒータの定格出力運転、及び定格とゼロ出力へのステップ状の立ち上げと立ち下げを繰り返すサイクル運転を支障なく行うことができ、本加熱試験設備を用いてのブランケット・モジュール熱サイクル試験が可能であることを確認した。

本報告は、ブランケット・モジュールの繰り返し熱負荷試験を行うための加熱試験設備の概要及び性能確認試験、遮蔽ブランケット小規模モジュールの予備加熱試験及び温度解析に関するものである。

那珂研究所 : 〒 311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

+ ITER 業務推進室

\* 株式会社日立製作所

Heating Facility for Blanket and Performance Test

Kazuyuki FURUYA, Shigemitsu HARA \* ,Toshimasa KURODA,  
Mikio ENOEDA, Satoshi SATO, Toshihisa HATANO,  
Hideyuki TAKATSU + and Yoshihiro OHARA

Department of Fusion Engineering Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 3, 1999)

A design and a fabrication of heating test facility for a mock-up of the blanket module to be installed in International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) have been conducted to evaluate/demonstrate its heat removal performance and structural soundness under cyclic heat loads. To simulate surface heat flux to the blanket module, infrared heating method is adopted so as to heat large surface area uniformly. The infrared heater is used in vacuum environment ( $10^{-4}$  Torr~), and the lamps are cooled by air flowing through an annulus between the lamp and a cover tube made of quartz glass. Erastomer O rings (available to be used up to  $\sim 300^{\circ}\text{C}$ ) are used for vacuum seal at outer surface of the cover tube. To prevent excessive heating of the O ring, the end part of the cover tube is specially designed including the tube shape, flow path of air and gold coating on the surface of the cover tube to protect the O ring against thermal radiation from glowing tungsten filament. To examine the performance of the facility, steady state and cyclic operation of the infrared heater were conducted using a small-scaled shielding blanket mock-up as a test specimen.

The important results are as follows:

- (1) Heat flux at the surface of the small-scaled mock-up measured by a calorimeter was  $\sim 0.2\text{MW/m}^2$ .
- (2) A comparison of thermal analysis results and measured temperature responses showed

---

+ Office of ITER Project Promotion

\* Hitachi, Ltd.

that the small-scaled mock-up had good heat removal performance.

(3) Steady state operation and cyclic operation with step response between the rated and zero powers of the infrared heater were successfully performed, and it was confirmed that this heating facility was well-prepared and available for the thermal cyclic test of a blanket module.

**Keywords :** ITER, Small/Mid-scaled Shielding Blanket Mock-ups,  
Thermo-mechanical Test, Heating Facility, Infrared Heater

This is a blank page.

## 目 次

1.はじめに.....	1
2.加熱試験設備の概要.....	2
2.1 全体構成.....	2
2.2 加熱装置.....	2
2.3 カロリメータ.....	4
2.4 熱遮蔽板.....	4
2.5 真空容器.....	4
2.6 冷却装置.....	5
2.7 真空排気装置.....	6
2.8 計測制御機器.....	6
3.予備試験体.....	6
4.加熱試験設備の特性評価.....	7
4.1 真空排気試験.....	7
4.2 热流束測定試験.....	7
4.3 热バランス評価.....	8
4.4 热サイクル運転試験.....	9
5.小規模モジュール温度解析.....	10
5.1 定常温度解析結果.....	10
5.2 過渡温度解析結果.....	10
6.まとめ.....	11
謝辞.....	11
参考文献.....	12

## Contents

1. Introduction.....	1
2. Heating Facility.....	2
2.1 Overall Composition.....	2
2.2 Heating Device.....	2
2.3 Calorimeter.....	4
2.4 Thermal Shield.....	4
2.5 Vacuum Vessel.....	4
2.6 Coolant Loops.....	5
2.7 Vacuum Pumping Device.....	6
2.8 Instrumentation and Control Devices.....	6
3. Small-scaled Blanket Module for Pre-test.....	6
4. Performance Test of Heating Facility.....	7
4.1 Vacuum Exhaust Test.....	7
4.2 Heat Flux Measurement.....	7
4.3 Estimation of Heat Balance.....	8
4.4 Thermal Cycle Operation Test.....	9
5. Thermal Analysis of Small-scaled Blanket Module.....	10
5.1 Result of Steady-state Temperature Analysis.....	10
5.2 Result of Transient Temperature Analysis.....	10
6. Summary.....	11
Acknowledgement.....	11
References.....	12

## 1 はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)計画の前半10年間である基本性能段階(Basic Performance Phase ; BPP)において炉内に装荷される遮蔽ブランケット・モジュールは、高さ～1m、幅～2m、奥行き～0.4m、重さ～4tの複合構造体である。遮蔽ブランケット・モジュールはプラズマに対向する第一壁と遮蔽体とからなる。第一壁は複数個のオーステナイトステンレス鋼(SUS)製冷却管と、プラズマからの熱負荷の除熱促進の為の熱シンク材であるアルミナ分散強化銅(DSCu)板から構成され、高い表面熱流束(最大～0.5 MW/m<sup>2</sup>)及び中性子壁負荷(最大～1.2 MW/m<sup>2</sup>)、強大な電磁力(捻り力；最大～4.5 MN/m、面圧；最大～1.5 MPa)等に十分に耐え得るよう、SUS製冷却管をDSCu板で挟み込む複合構造を採用している。遮蔽体はSUS製のブロック塊で、ドリル穴加工により製作された複数個の冷却流路を有している。第一壁の各構成部位及び遮蔽体は高温等方加圧(Hot Isostatic Pressing ; HIP)接合法により同時に接合される。HIP接合法は拡散接合の一種で、高温、高圧下における不活性ガス中にて接合材同士を圧着させることにより元素拡散による強固な金属間結合が得られるものである。HIP接合条件としては、接合条件選定試験等の結果より、温度：1050°C、圧力：150MPa、保持時間：2時間が最適であることが明かとなっている<sup>[1]</sup>。

遮蔽ブランケット・モジュールの製作性評価を行う為、第一壁部のみを模擬した板状の第一壁部分モデル、全体形状及び構造を模擬した匡体状の小規模モジュール及び小規模モジュールをスケールアップした中規模モジュール、製作性実証の為のプロトタイプの製作をHIP接合法を用いて行った<sup>[2,3]</sup>。いずれの場合も形状・寸法精度共に良好で、金相観察等の結果よりHIP接合部における有為な欠陥等は確認出来なかった。第一壁部分モデルに対しては粒子ビームによる繰り返し熱負荷試験を実施し、HIP接合面の機械的強度評価等がなされているが<sup>[4]</sup>、実機形状を模擬した匡体状のモジュールに対しては構造健全性評価等はなされていないことから試験の実施が急務である。

本ブランケット熱機械試験は、HIP接合法により製作を行った遮蔽ブランケット中規模モジュールの繰り返し熱負荷に対する構造健全性の評価・実証であり、実機ブランケット・モジュールに負荷される相当繰り返し熱応力を中規模モジュールに対して模擬することで、熱応力に対するHIP接合条件等の設計妥当性を総合的に評価することを目的とするものである。本試験を行うに当たり、ブランケット・モジュールへの表面熱流束を模擬する為の加熱試験設備を新規に設計・製作した。加熱試験設備は主に加熱装置(赤外線ヒータ)、熱流束測定用カロリメータ、赤外線ヒータからの熱より真空容器内部機器類を保護する為の熱遮蔽板、これらを収納する真空容器、冷却装置(水、空気)、真空排気装置、及び計測制御装置等により構成される。プラズマからの表面熱流束を模擬する為の赤外線ヒータは、一本当たり8kWの高出力が得られる赤外線ランプを合計20本内蔵しており、総出力160kWである。中規模モジュールを用いた試験に先立ち、中規模モジュールの前段階として製作を行った小規模モジュールによる予備試験を実施し、本加熱試験設備の特性を把握すると共に、定格出力運転及び熱サイクル運転が可能であることを確認した。

本報告は、遮蔽ブランケット中規模モジュールによる繰り返し熱負荷試験を行う為の加熱試験設備の概要、及び小規模モジュールを用いた予備加熱試験に関するものである。

## 2 加熱試験設備の概要

### 2.1 全体構成

加熱試験設備は主に、

- (1)表面熱流束を模擬するための加熱装置
- (2)表面熱流束測定用カロリメータ
- (3)計測機器類を熱より保護する熱遮蔽板
- (4)試験体及び試験機器類等を収容する真空容器
- (5)加熱装置や試験体等の冷却装置
- (6)真空排気装置
- (7)加熱試験設備全体の監視及び制御、試験データ収集等を行う計測制御機器等より構成される。

### 2.2 加熱装置（赤外線ヒータ）

#### 2.2.1 赤外線ヒータの構造概要

表面熱流束の模擬に使用する赤外線ヒータの外観を図1に、概略寸法を図2に、赤外線ランプの取り付け箇所周辺構造を図3に、主要諸元を表1にそれぞれ示す。赤外線ヒータに使用されている赤外線ランプの発光体は発光長560mmのタンゲステンワイヤで、内部にハロゲンガスが封入されている。ランプ一本当たりの出力は約8kWと高出力であり、真空中で使用することから無冷却ではランプ自体の健全性担保が困難であるため、ランプに石英製の保護管を被せ、ランプと保護管との約1mmのギャップ間に空気を流動させ、ランプ自体を冷却している。赤外線ヒータは真空雰囲気中に置かれる為、冷却空気の真空パウンダリとしてエラストマ系Oリング（カルレツ）を使用している。カルレツは耐熱性に優れ、約300°Cでの連続使用が可能である。

表1 赤外線ヒータの主要諸元

項目	仕様
加熱方式	赤外線
発光体	タンゲステンワイヤ
発光長（ランプ一本当たり）	560mm
封入ガス	ハロゲン
出力（ランプ一本当たり）	8kW
ランプ本数	20本
総出力	160kW
ランプピッチ	30mm
電圧	600V
ランプ管／保護管／外装管材質	石英ガラス
真空バウンダリ用Oリング	カルレツ
Oリング耐熱温度	313°C
ランプハウジング材質	アルミ
冷却方式	ランプ：圧縮空気 ハウジング：水

図3に示す様に、Oリング装着部分には保護管の外側に更にもう一層石英管（外層管）を取り付けた2重構造となっており、外層管裏側は金コーティングしてある。また、ハウジングにエアノズルを設けることによりOリングの当たり面を集中的に冷却している。これは、冷却空気からの直接的な伝熱及び輻射熱よりOリングを保護する為である。ランプは横向きで縦方向に計20本取り付けられており、アルミ製のハウジングに収納されている。ハウジングの上下左右には反射板を張り出して設けると共にランプ対向面に反射率を向上させる為の金蒸着を施すことにより熱の指向性を向上させている。また、ハウジングは過度な温度上昇や熱伸び等を抑える為に水冷却されている。

## 2.2.2 热流束の予測値

加熱装置単体として得られる熱流束予測値の概略計算を行った。ランプ1本当たりの電気的な出力は8kWであるが、熱的な出力に換算する必要があるため、以下に示す各効率を考慮しなければならない。即ち、

- (1)電気的なエネルギーから熱的なエネルギー（赤外線波長領域）への変換効率…0.85
- (2)石英管及び保護管の赤外線透過効率…0.9
- (3)反射板の赤外線反射効率…0.95
- (4)反射した赤外線の石英管及び保護管再度透過効率…0.95

以上の各効率を考慮するとランプ1本当たりの正味の熱的な出力は、

$$8 \text{ kW} \times 0.85 \times 0.9 \times 0.95 \times 0.95 \approx 5.52 \text{ kW}$$

ここで、発光長560mmのランプが30mmピッチにて20本並んでいるのでランプの熱的な合計出力は約110kWであり、また赤外線ヒータ照射面積は0.336m<sup>2</sup>であることから、赤外線ヒータ表面からの熱流束の概略予測値は、

$$110 / 0.336 \approx 330 \text{ kW/m}^2$$

よって、概ね0.33MW/m<sup>2</sup>であると予測される。

### 2.3 カロリメータ

予備試験体表面への熱流束測定用にはカロリメータを使用した。カロリメータの外観を図4に、概略寸法を図5に、主要諸元を表2にそれぞれ示す。カロリメータは真空容器外部より上下に移動することが可能で熱流束測定を行わない時には下部に収納される。カロリメータチップは直径：10mmの無酸素銅（OFCu）で、OFCuにはK型熱電対が埋め込まれている。また、チップ表面以外への入熱を避けるために円筒形のカバー（SUS製）により熱シールドされている。チップは赤外線ヒータに対向してSUS製のカロリメータ枠に計30個取り付けられており、これらのチップからの温度応答により、予備試験体表面への熱流束を同定することが出来る。熱流束は下式により算出した。

$$Q = (m \times C_p \times \Delta T) / A$$

ここで、

$Q (\text{W/m}^2)$  : チップへの表面熱流束

$m (\text{kg})$  : チップ質量

$C_p (\text{J/kg} \cdot \text{K})$  : チップ定圧比熱

$\Delta T (\text{K/s})$  : チップ温度上昇率

$A (\text{m}^2)$  : チップ表面積

表2 カロリメータ主要諸元

項目	仕様
カロリメータチップ材質	OFCu
熱電対	K型 ( $\phi 1\text{mm}$ )
チップ総数	30個
冷却方式	無冷却

### 2.4 熱遮蔽板

予備試験体周囲には、真空容器及び架台、配管・配線等の容器内機器類を、赤外線ヒータからの熱より保護する為の熱遮蔽板が取り付けられている。熱遮蔽板の外観を図6に、概略構造を図7にそれぞれ示す。熱遮蔽板は予備試験体とヒータとの間を覆う様に設置されており、厚さ5mmのSUS製の基盤上（表面積： $\sim 2\text{m}^2$ ）に、内寸法： $17 \times 17\text{ mm}$ 、肉厚：1mmの矩形冷却配管が密に取り付けられている。熱遮蔽板表面はカーボンスプレーにより黒化処理されている。

### 2.5 真空容器

加熱試験は、熱損失低減や安全性、放電防止等を考慮し、真空雰囲気中 ( $10^{-4}$  Torr 台) にて行う為、予備試験体を始め、赤外線ヒータ、カロリメータ、及び熱遮蔽板等は真空容器内に設置される。真空容器の外観を図8に、概略寸法を図9にそれぞれ示す。真空容器は上蓋と下蓋より構成されており、互いにボルトにより固定される。上蓋には、試験体表面観察用ビューポートが二個、真空容器表面温度計測用熱電対が二本、電離真空計、

真空リーク弁、計測用ポート及び安全弁がそれぞれ一個づつ取り付けられている。ビューポートの一つにはフッ化バリウムガラスを使用しているので、外部から放射温度計等により加熱中の試験体表面温度が測定可能である。下蓋には、赤外線ヒータへの電源供給ライン（交流600V）、真空排気装置、各種計測制御線、冷却水／空気供給ライン、ベント弁、及びカロリメータ移動装置等がそれぞれ接続されている。

## 2.6 冷却装置

予備試験体及び熱遮蔽板への冷却水の供給には、500kWの除熱量を有する水ループを用いた。水ループの外観を図10に、概略構造を図11に、1・2次系ポンプ性能曲線をそれぞれ図12、13に、主要諸元を表3にそれぞれ示す。本水ループは主に1次系ポンプ、2次系ポンプ、加圧タンク、制御装置、及び冷却塔より構成される。

表3 試験体／熱遮蔽板冷却装置（500kW水ループ）の主要諸元

項目	仕様
除熱量	500kW
1次冷却水循環水量	~800L/min
2次冷却水循環水量	~1500L/min
1次系設計温度	99°C
2次系設計温度	50°C
1次系設計圧力	3.5MPa
2次系設計圧力	0.5MPa

赤外線ヒータの赤外線ランプ、電極、及びOリングの冷却には圧縮空気ポンプ（ベビコン）を使用している。ベビコンにはエアドライヤが取り付けられており、乾燥空気を吐出出来る。赤外線ヒータのハウジングの冷却には水冷却装置（チラー）を2基使用している。チラーは5～25°Cの範囲で水温調節が可能である。ベビコン及びチラーの主要諸元を表4、表5にそれぞれ示す。

表4 ベビコンの主要諸元

項目	仕様
循環流量	~1750L/min
吐出圧力	~0.7MPa

表5 チラーの主要諸元

項目	仕様
除熱量	25kW/1基
循環流量	~140L/min/1基
吐出圧力	~0.45MPa

## 2.7 真空排気装置

本試験は真空雰囲気中にて行う為、真空容器にはロータリポンプ（粗引き用）と複合分子ポンプが接続されている。それぞれの主要諸元を表6に示す。真空容器内が常圧の場合、初めにロータリポンプにて到達圧力値として $5 \times 10^{-2}$  Torr程度まで粗引きを行い、続いて複合分子ポンプにて $1 \times 10^{-4}$  Torr程度まで真空排気を行う。試験は $10^{-4}$  Torr台の真空雰囲気中にて行われるが、これは、真空容器内に設置されている赤外線ヒータには600Vの高い電圧がかかる為、放電現象における電圧値と周囲雰囲気との関係（パッシエンの法則；図14参照）より、到達圧力値が $10^{-3}$  Torr台に低下した場合、真空容器内で放電現象が起こる危険性が増大する為である。

表6 真空排気装置（ロータリポンプ、複合分子ポンプ）の主要諸元

項目	仕様	
	ロータリポンプ	複合分子ポンプ
到達圧力	$\sim 6.7 \times 10^{-2}$ Pa	$\sim 1 \times 10^{-7}$ Pa
排気速度	760L/min	1300L/s
冷却方式	自己冷却	水冷

## 2.8 計測制御機器

本試験設備における計測制御機器は主に赤外線ヒータ制御盤、500kW水ループ制御盤、インターロック制御盤、及び試験データ収録装置より構成される。試験設備全体の計測制御機器の構成を図15に示す。赤外線ヒータの出力調整、熱サイクル運転パターンのプログラミング等は赤外線ヒータ制御盤より、冷却水の流量・温度等の調節／制御は500kW水ループ制御盤よりそれを行なう。図16のインターロックブロック線図に示す様に、赤外線ヒータ制御盤及びインターロック制御盤と加熱装置（赤外線ヒータ）及び真空排気装置は互いにインターロックにて連動しており、真空リーク等の異常を検出した場合は冷却装置及び試験データ収録装置を除く全装置が適切に停止する。

## 3 予備試験体(小規模モジュール)

本予備加熱試験において使用したプランケット小規模モジュール（予備試験体）の外観を図17に、概略構造・寸法を図18にそれぞれ示す。予備試験体の概略寸法は、高さ： $\sim 0.5$ m、幅： $\sim 0.4$ m、奥行き： $\sim 0.2$ mで、主に第一壁部と遮蔽体部より構成される。第一壁部は、それぞれの厚さが約5mmと14mmのDSCu板とSUS板との間に、内寸： $5 \times 10$ mm、肉厚：1mmの計33本の矩形冷却配管を挟み込む構造であり、表面中央部、及び上下端部において高さ方向へそれぞれR=2000mm、R=60mmの曲率を有する。遮蔽体はSUSブロック塊で、直径24mmの冷却流路が高さ方向へドリル穴加工により設けられている。冷却流路は前／後列に分かれており、前列10個、後列8個の計18個である。予備試験体への冷却水は第一壁部と遮蔽体部とにそれぞれ独立に供給される。冷却水

は2対の入口／出口配管より供給され、それぞれの配管には圧力測定用静圧タップが設けられている。また、図18に示す様に、第一壁表面温度測定用熱電対（Kタイプ）が予備試験体左右端にそれぞれ5本づつ、上下端中央にそれぞれ1本づつ、遮蔽体温度測定用熱電対（Kタイプ）が予備試験体裏面中央に1本設けられている。

#### 4 加熱試験設備の特性評価

2項にて記述した加熱試験設備の真空特性、流動特性の評価及び予備試験体を組み込んでの熱流束分布、熱バランス測定等の予備加熱試験を行った。試験における計測データの種類と計測対象を表7に、計測位置を図19にそれぞれ示す。

表7 計測データの種類及び計測対象

計測データの種類	計測対象
試験体温度	第一壁部（12点）、遮蔽体部（1点）
熱流束	カロリメータチップ（30点）
熱遮蔽板温度	熱遮蔽板上部（1点）、下部（1点）
真空容器内架台温度	試験体据付け部（1点）
真空容器温度	真空容器上部（2点）、下部（1点）
試験体冷却水温度	入口（1点）、第一壁出口（1点）、遮蔽体出口（1点）
熱遮蔽板冷却水温度	入口（1点）、出口（1点）
加熱装置冷却水温度	入口（1点）、出口（1点）
加熱装置冷却空気温度	入口（1点）、出口（1点）
試験体冷却水流量	第一壁部（1点）、遮蔽体部（1点）
熱遮蔽板冷却水流量	入口（1点）
加熱装置冷却水流量	総流量（1点）、ランプ冷却用（1点）
到達圧力	真空容器内（1点）

##### 4.1 真空排気試験

真空排気は真空容器内が常温・常圧の空気雰囲気より開始した。真空容器内の体積は約4m<sup>3</sup>で、排気速度が760L/minの粗引き用ロータリポンプ1台と1300L/secの複合分子ポンプ1台を使用した。真空容器内到達圧力の時間変化を図20に示す。リーク等の問題は特に無く、試験環境基準として定めた到達圧力値（ $1 \times 10^{-4}$  Torr）までの真空排気時間は初回で約4時間であった。

##### 4.2 熱流束測定試験

赤外線ヒータからの試験体表面への熱流束値をカロリメータにより測定し、試験体の表面熱流束分布を求めた。カロリメータと試験体との位置関係、及びカロリメータチップの

詳細形状を図21に、試験条件を表8にそれぞれ示す。カロリメータチップ個数は計30個で、試験体表面全体の表面熱流束分布が計測可能な様、適宜分散配置されている。表面熱流束値は以下の式により求めた。即ち、

$$Q = (m \times C_p \times \Delta T) / A$$

ここで、

$Q (\text{W/m}^2)$  : チップへの表面熱流束

$m (\text{kg})$  : チップ質量

$C_p (\text{J/kg} \cdot \text{K})$  : チップ定圧比熱

$\Delta T (\text{K/s})$  : チップ温度上昇率

$A (\text{m}^2)$  : チップ表面積

表8 热流束測定試験条件

赤外線ヒータ出力			160kW (定格出力)
冷却水流量	試験体	第一壁部	140~145L/min
		遮蔽体部	50~55L/min
	熱遮蔽板		50~60L/min
冷却空気流量	ランプ部		1200L/min
	電極部		1200L/min
熱流束測定時間			10 s

熱流束測定は冷却水、冷却空気、試験体、熱遮蔽板、真空容器等の温度がほぼ一定になった時点（機器の熱バランスが定常の状態）にて計5回行った。代表的な表面熱流束分布を図22に示す。試験体への表面熱流束は、試験体中央部付近が最も高く、端に寄るほど低くなる山なり分布の傾向を示している。これは、赤外線ヒータからの熱流束の収束性向上の為の反射板が設けられているものの、端部においては熱が拡散してしまう為である。カロリメータより得られた表面熱流束の最大値は～0.2MW/m<sup>2</sup>であり、最小値は～0.08MW/m<sup>2</sup>であった。試験体での熱吸収の高効率化や熱流束の均一化（試験体表面は粗くして黒化し、試験体以外の部位は鏡面仕上げして金蒸着を施す、熱遮蔽板等の形状を改良する、等）が今後の課題である。

#### 4.3 热バランス評価

赤外線ヒータからの真空容器内各機器への入熱バランスを評価した。各機器への入熱は、各機器が熱的に定常状態になった時点で求めた。熱バランス測定試験条件を表9に示す。

表9 热バランス測定試験条件

赤外線ヒータ出力		160kW (定格出力)
冷却水流量	試験体	第一壁部 140~145L/min
		遮蔽体部 50~55L/min
	熱遮蔽板	50~60L/min
冷却空気流量	ランプ部	1200L/min
	電極部	1200L/min

各機器への入熱の百分率を図23に示す。入熱が最も大きいものは熱遮蔽版で、続いて赤外線ヒータの冷却水であった。試験体、赤外線ヒータの冷却ガス、及び真空容器を含む容器内機器類への入熱はほぼ等しい値であった。入熱の90%程度が試験体以外の部位に吸収されていることになる。熱遮蔽版への入熱が最も高い理由としては、試験体と比較した場合、表面が粗く、かつ、表面積が大きいことなどが挙げられる。よって熱遮蔽版の形状や表面状態の改良により試験体への入熱の相対的な増加が可能と思われる。

#### 4.4 热サイクル運転試験

試験体に繰り返し熱疲労を与えるための熱サイクル運転試験を行い、運転時における試験体表面温度の時間変化を測定した。熱サイクルは赤外線ヒータ電源のON/OFFの自動切り替えにより模擬し、ヒータ出力は電源投入から1秒後に定格となるよう設定した。熱サイクル運転試験条件を表10に、1サイクル時間が5分（加熱時間4分／運転停止時間1分）及び10分（加熱時間5分／運転停止時間5分）の場合の試験体表面温度の時間変化を図24及び25にそれぞれ示す。図24より、加熱時間4分では試験体表面温度はほぼ定常（～58°C）に達したが、運転停止時間1分では試験体表面温度は10°C程度までしか低下せず、熱サイクル運転開始前の初期温度（4°C（＝冷却水温度））までは回復しなかった。一方、図25より、試験体表面温度は加熱時間5分で十分定常状態に達しており、運転停止時間5分でほぼ初期温度まで回復した。運転停止時間が1分では不十分であった理由の一つとして熱遮蔽版や真空容器等からの試験体表面への輻射熱の影響が考えられるため、輻射熱の影響が無視できる温度まで周囲構造物を冷却するための時間を1サイクル時間に加味する必要があると思われる。

表10 热サイクル運転試験条件

赤外線ヒータ出力			0~160kW (定格出力)
1サイクル時間			5分 (加熱時間4分/運転停止時間1分)
			10分 (加熱時間5分/運転停止時間5分)
冷却水流量	試験体	第一壁部	104~105L/min
		遮蔽体部	60~61L/min
	熱遮蔽板		50~60L/min
冷却空気流量	ランプ部		1200L/min
	電極部		1200L/min

## 5 小規模モジュール温度解析

本加熱試験設備の性能確認試験に使用した予備試験体である遮蔽ブランケット・モジュール小規模モックアップの二次元定常及び過渡温度解析を行った。本温度解析で使用した解析モデル及び解析条件を図26、27にそれぞれ示す。解析対象は小規模モジュール中央部横断面とした。解析条件の一つである表面熱流束は、本文4.2項で述べた熱流束測定試験より得られた試験体表面の三次元熱流束分布（図22参照）の内、本解析対象部に当る熱流束部分を最小二乗法により回帰曲線化したものを与えた。本解析においては、解析ソルバーとして、ADVANCED FEA(The MacNeal-Schwendler Corporation 製)を用いた。また、要素は1次要素とした。

### 5.1 定常温度解析結果

定常状態におけるモジュール断面温度分布を図28に示す。最高温度はモジュール表面中央部付近で見られ、約60°Cであった。モジュールの熱電対取付け位置に対応する部分の温度はモジュール正面に向かって左側が約57°C、右側が約52°Cであった。一方、モジュールの同箇所における熱電対による実測値（図29）は、左側が57~58°C、右側が約52~53°Cと解析結果と十分良く一致しており、第一壁部の製作性を含む除熱設計が妥当であることを確認した。

### 5.2 過渡温度解析結果

加熱装置による加熱開始から加熱停止までの過渡状態におけるモジュールの熱電対取付け位置に対応する部分の過渡温度変化を図30及び31に、同箇所における熱電対による実測値の過渡温度変化を図32及び33にそれぞれ示す。図30及び31より、表面温度は加熱開始から1分程度で十分定常に達しており、加熱停止後もまた、1分程度で十分定常に達している。一方、図32及び33より、実測値における加熱開始後1分間及び停止後1分間の温度と解析結果のそれを比較した場合、特に加熱停止後の過渡状態においては両温度に最大約2倍の違いが見られ、また、実測値が定常に達するまでの時間には相当の遅れが見られた。考えられる主な理由として、温度解析条件はモデル周囲を断熱としている。

るが、実際には加熱停止後においても熱遮蔽板等の周囲構造物が高温であることによる輻射熱の影響、実測値がモジュール冷却水の温度変化に追従してしまうこと、二次元解析であるため高さ方向への熱移動が解析上模擬出来ていないこと、解析上は水の物性値は一定としてあるが、実際には水温等の変化に伴う水物性値の変化等が挙げられる。

## 6　まとめ

プランケットの構造健全性に対する実証的試験を目的としたプランケット加熱試験設備の設計製作を行った。また、製作された本試験設備の性能評価、及びプランケット小規模モジュールを用いた予備加熱試験を行い、以下に示す結果及び課題を得た。

- (1) 遮蔽プランケット・モジュールの構造健全性実証試験を行う為に、表面熱流束模擬のための加熱試験設備の設計・製作を行った。
- (2) 加熱試験設備の性能評価により、本試験設備を用いて遮蔽プランケット・モジュールの加熱試験を行うに当たっての設備上の不具合を明らかとし、それに対する適切な改良を施した結果、赤外線ヒータの定格出力運転及びステップサイクル運転に成功し、本試験設備による熱サイクル試験が可能であることを確認した。
- (3) 赤外線ヒータからの小規模モジュールへの表面熱流束は $\sim 0.2 \text{MW/m}^2$ であった。
- (4) 定常温度解析結果より、小規模モジュールの除熱特性は良好であることが明かとなった。また、過渡温度解析結果と実測値の過渡温度応答の比較から、熱サイクル運転時間には、輻射熱等の影響を受けない程度まで周囲構造物を冷却するための時間を加味する必要があることが明らかとなった。
- (5) 赤外線ヒータからの主な各機器への入熱率は、熱遮蔽板が約40%と最も大きく、続いて、赤外線ヒータ冷却水の~23%、赤外線ヒータ冷却空気の~13%、小規模モジュールの~12%であった。
- (6) 赤外線ヒータからの熱を試験体表面以外へ極力逃さないよう試験体と赤外線ヒータとの間を熱遮蔽板にて可能な限りカバーする、試験体表面を粗くして黒化処理を施すなど、試験体への表面熱流束の相対的な増強を図るための改良が必要である。

## 謝　辞

本プランケット加熱試験設備の設置にあたり、その設計、製作等において多大な御協力を承りました、株式会社日立製作所日立工場並びに日立ニュークリアエンジニアリング株式会社の方々に深く感謝致します。また、試験遂行において多大な御助力、御協力を頂きました高津英幸ITER業務推進室課長（前プランケット工学研究室長）、小原祥裕プランケット工学研究室長並びにプランケット工学研究室員の方々に深く感謝致します。

### 参考文献

- [1] S. SATO, et al., JAERI-Research 97-092(1998).
- [2] H. YAMADA, et al., "Manufacturing of a Middle-scaled Shielding Blanket Module for ITER", to be published as Proc. 17th IEEE/NPSS Symp. on Fusion Eng., UCSD, 1997.
- [3] S. SATO, et al., "FABRICATION OF AN ITER SHIELDING BLANKET PROTOTYPE", to be published as Proc. 13th American Nuclear Society Topical Meeting on the Tech. of Fusion Energy, Tennessee, USA, 1998.
- [4] T. HATANO, et al., JAERI-Research 97-017(1997).

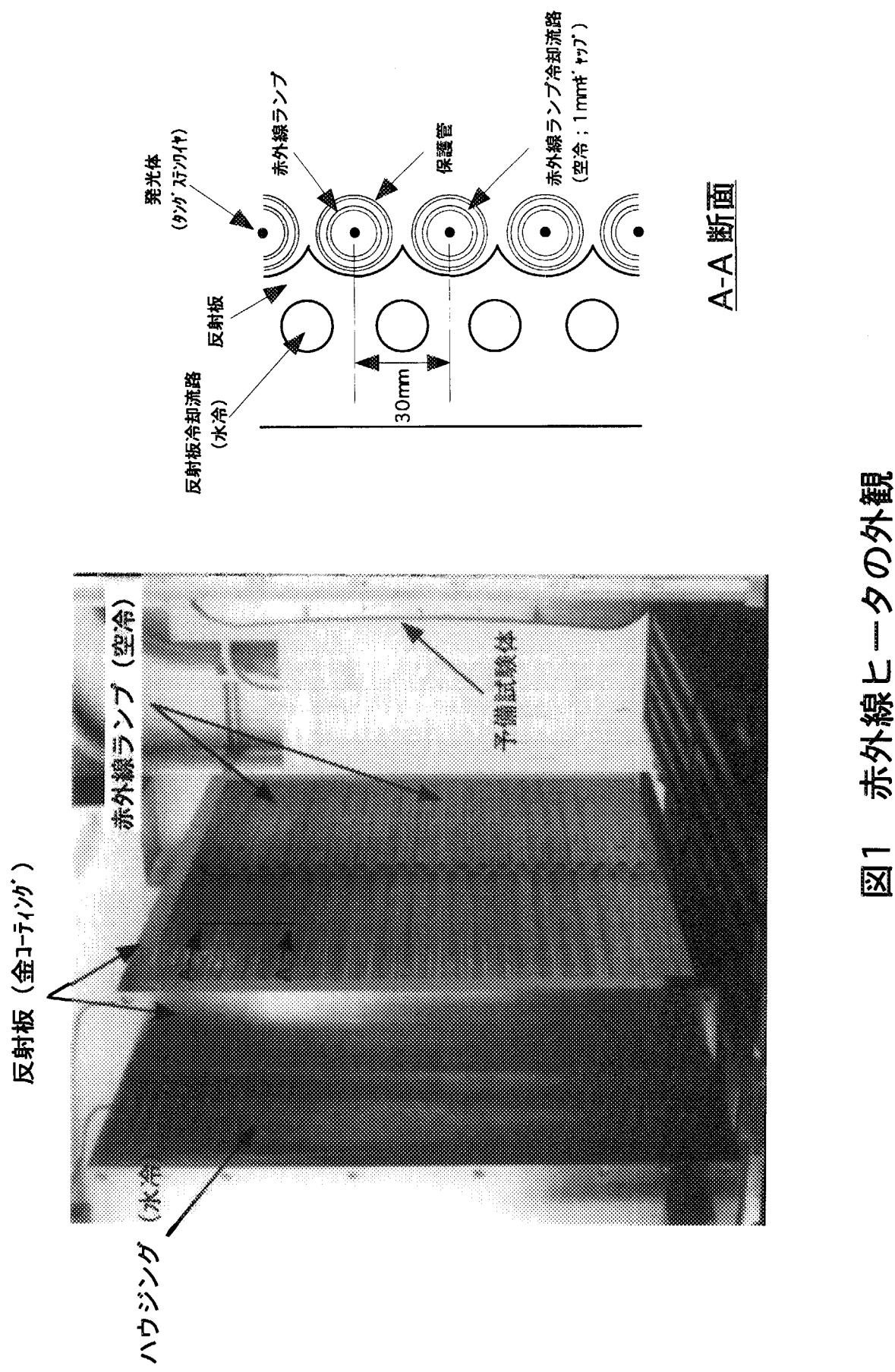
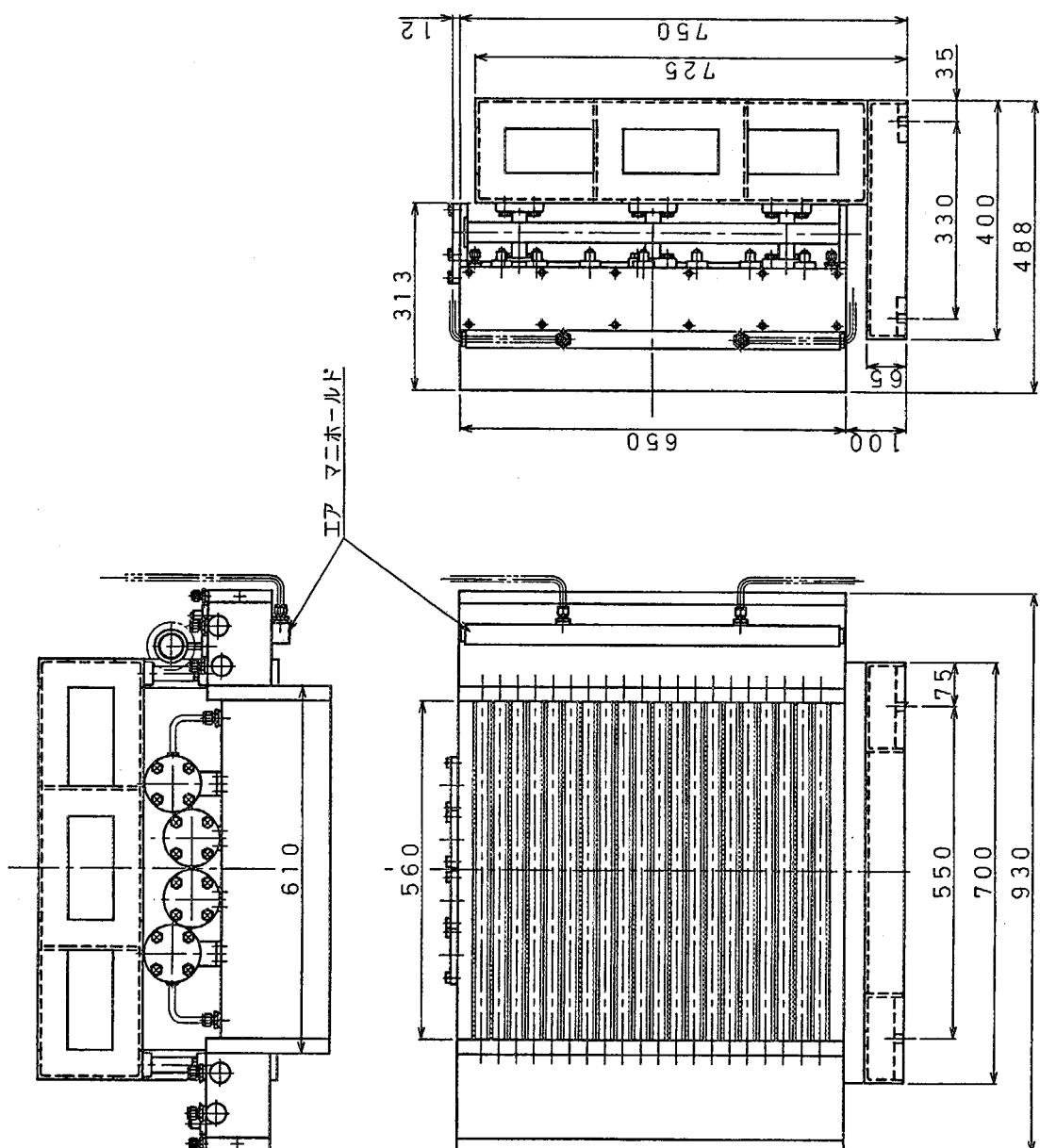


図1 赤外線ヒータの外観

図2 赤外線ヒータ概略寸法



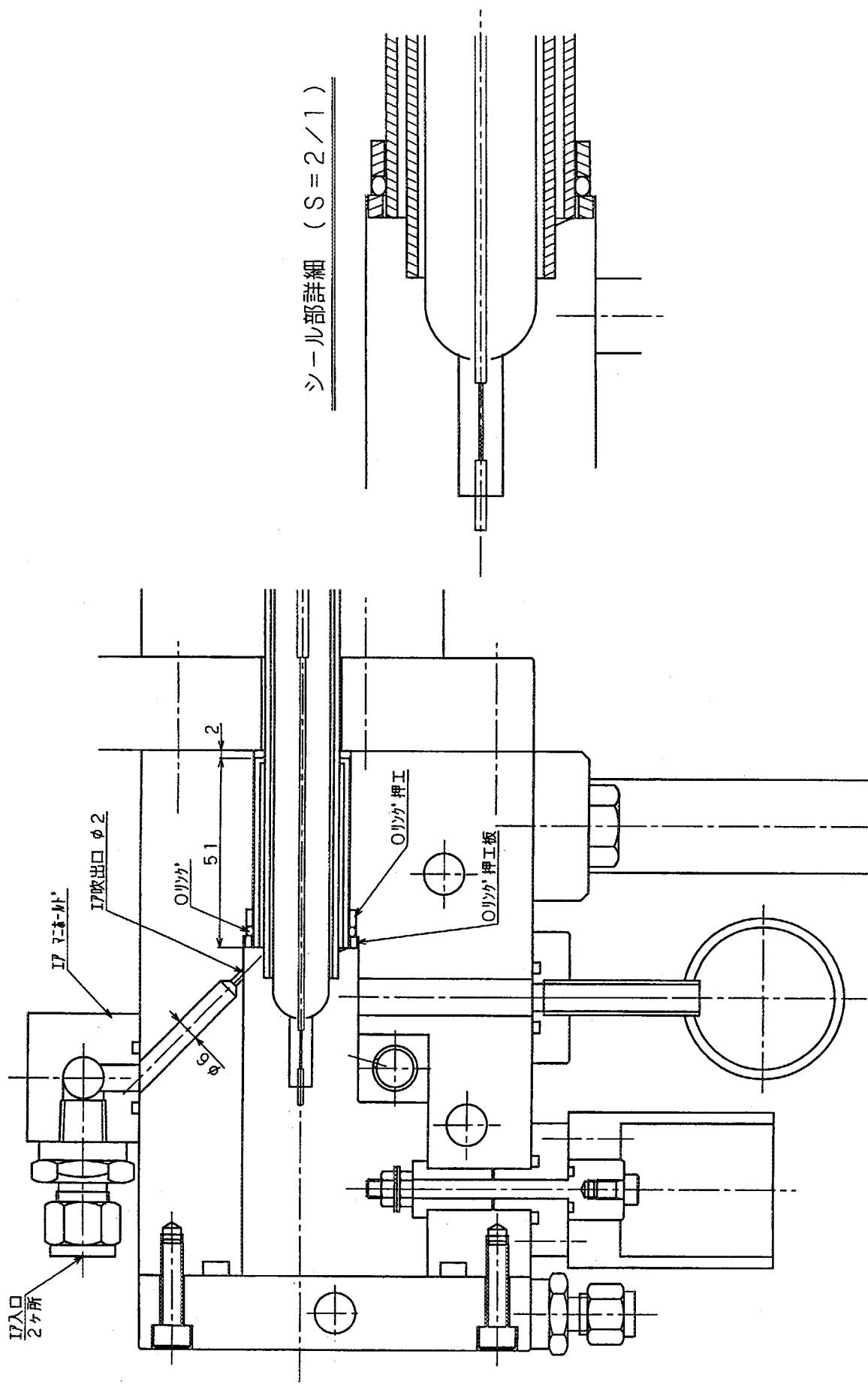


図3 赤外線ランプシール部構造

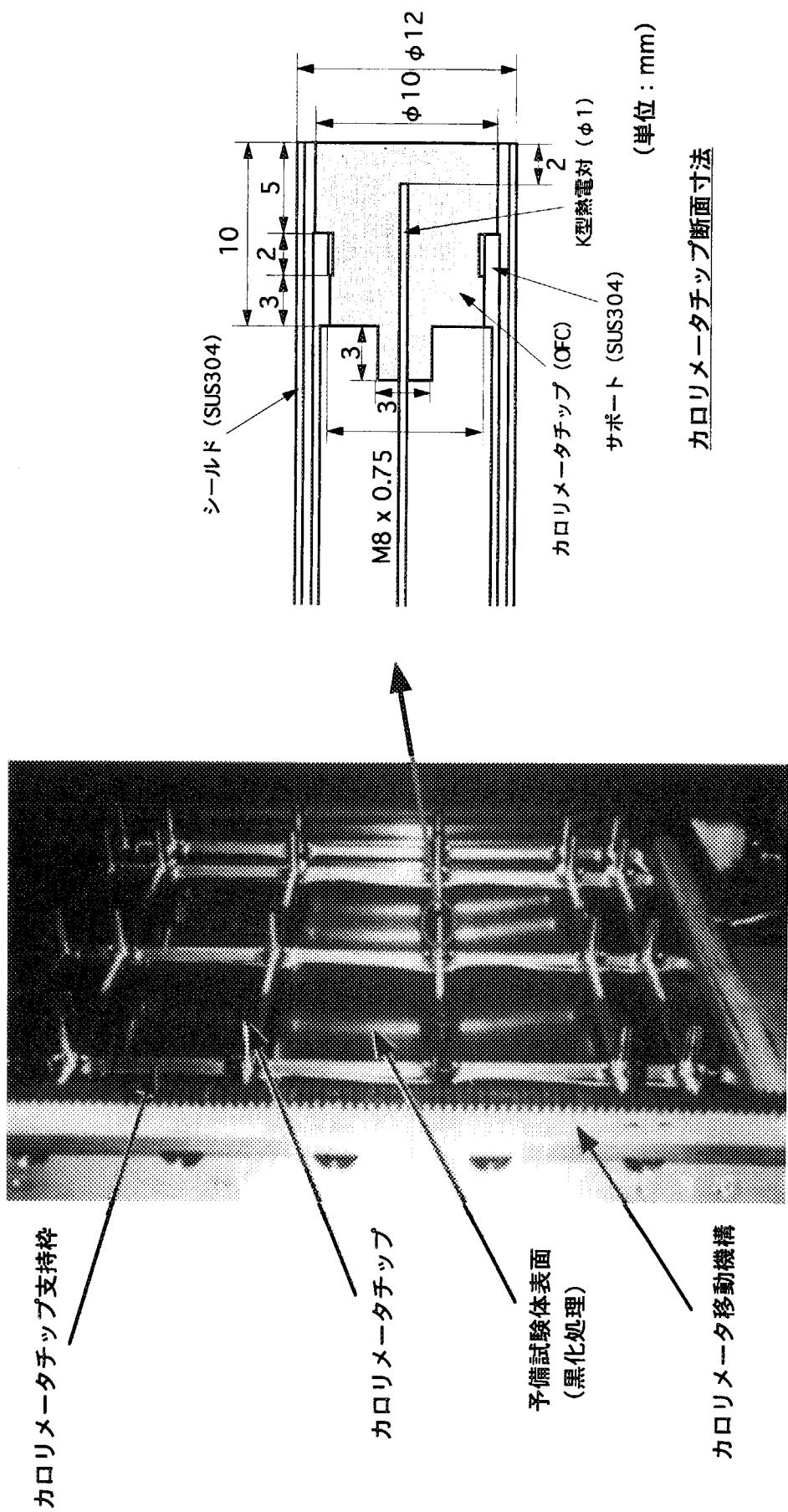
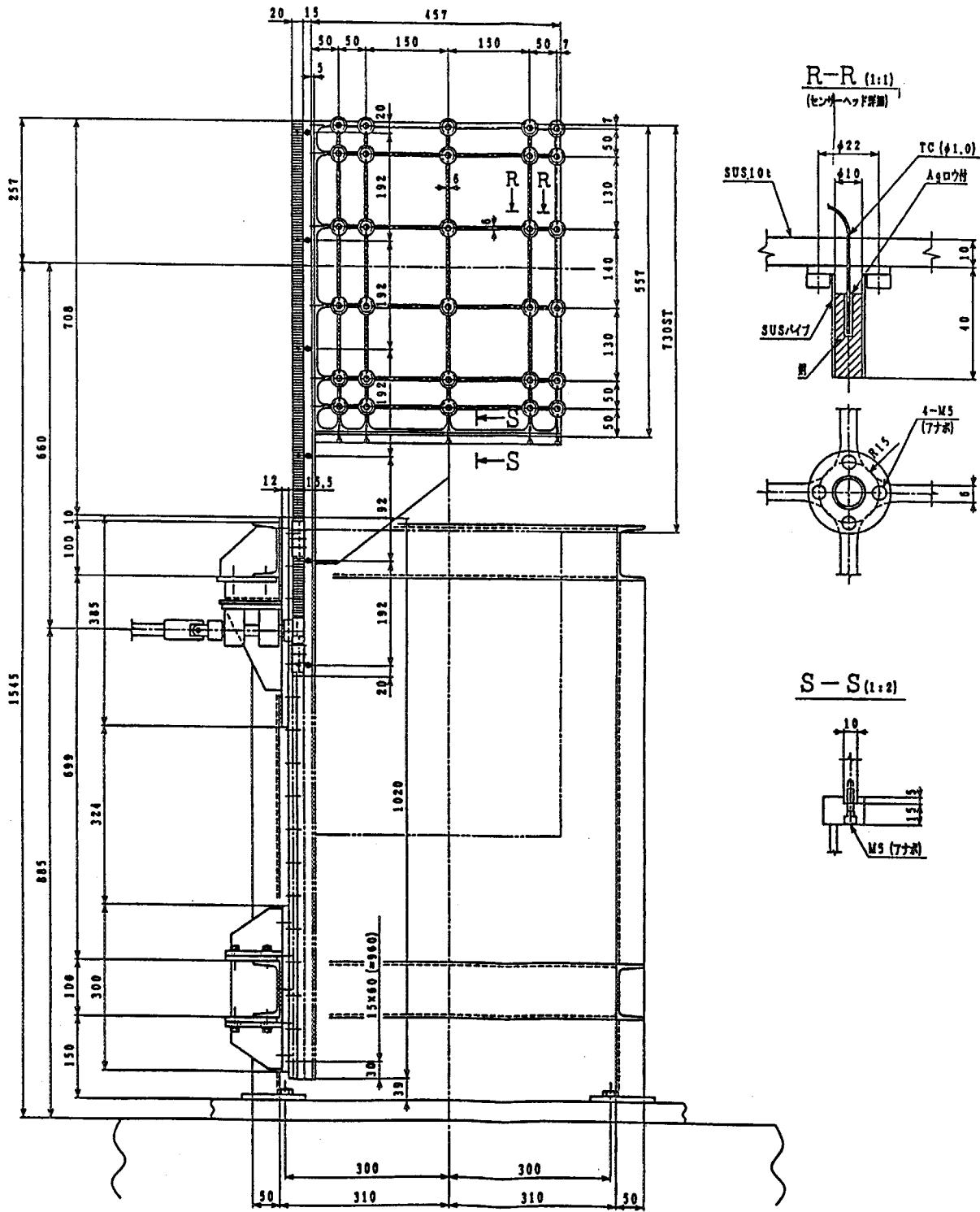


図4 カロリメータの外観



## 図5 カロリメータ概略寸法

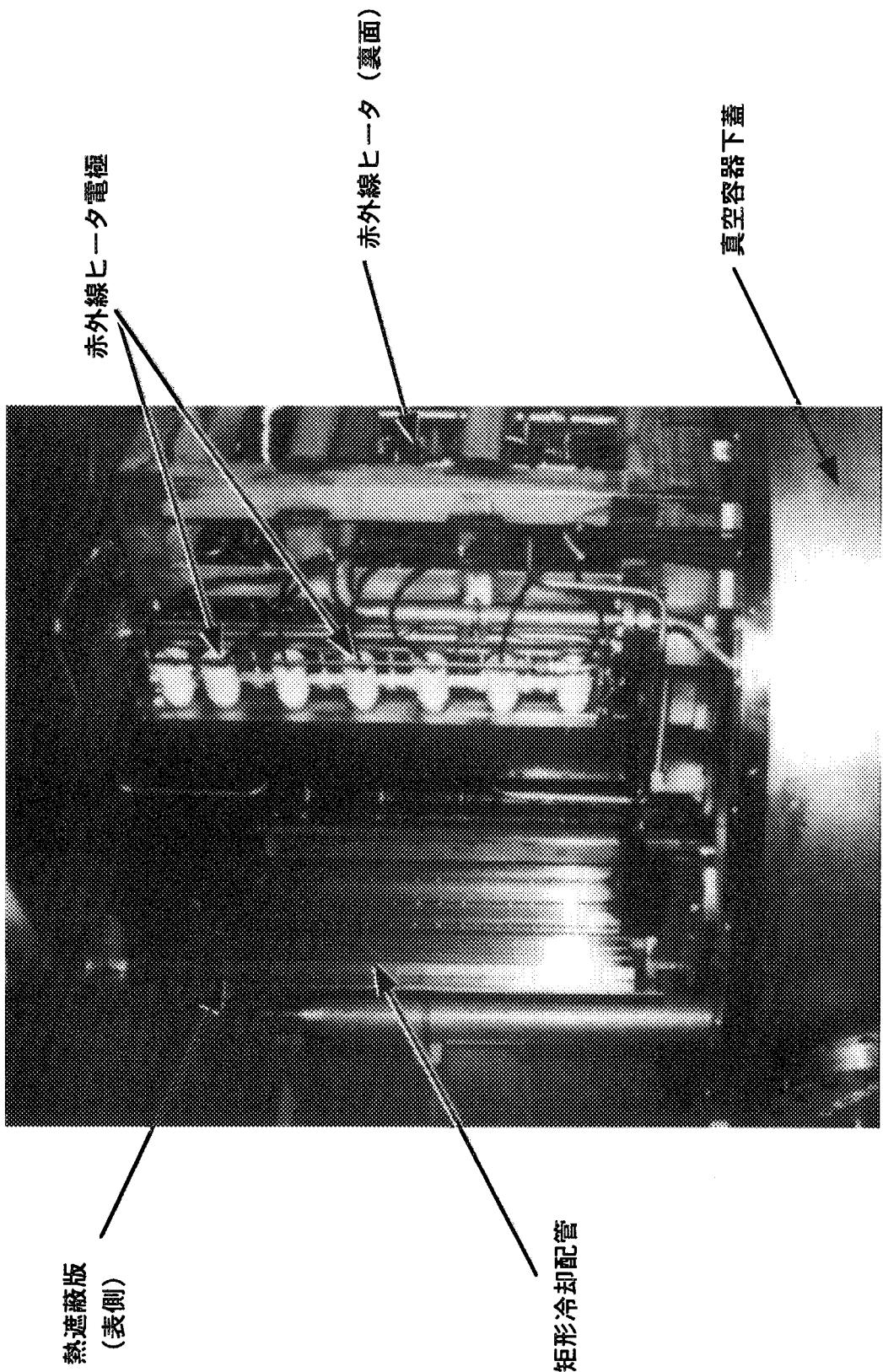


図 6 热遮蔽板の外観

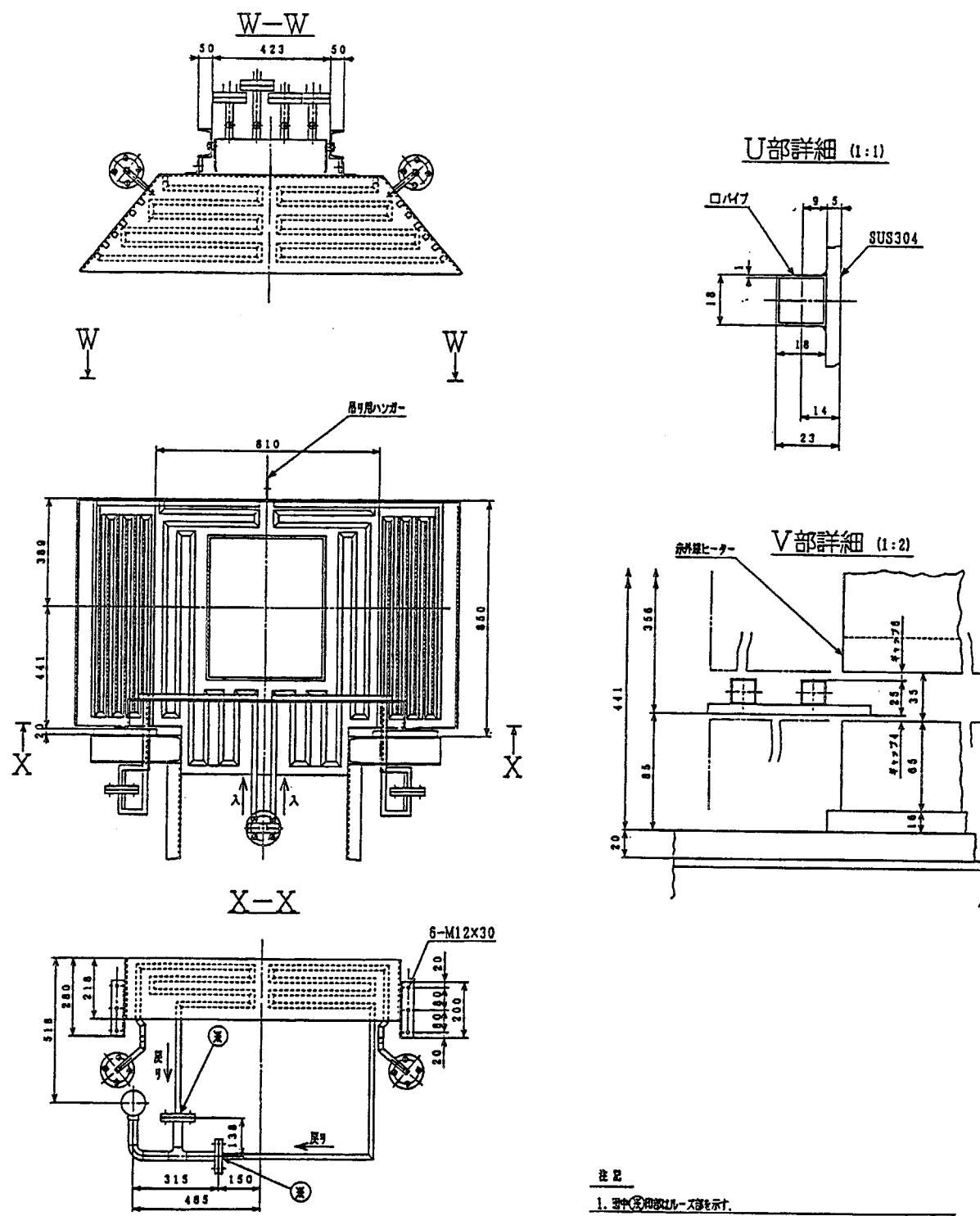


図 7 热遮蔽板の概略寸法

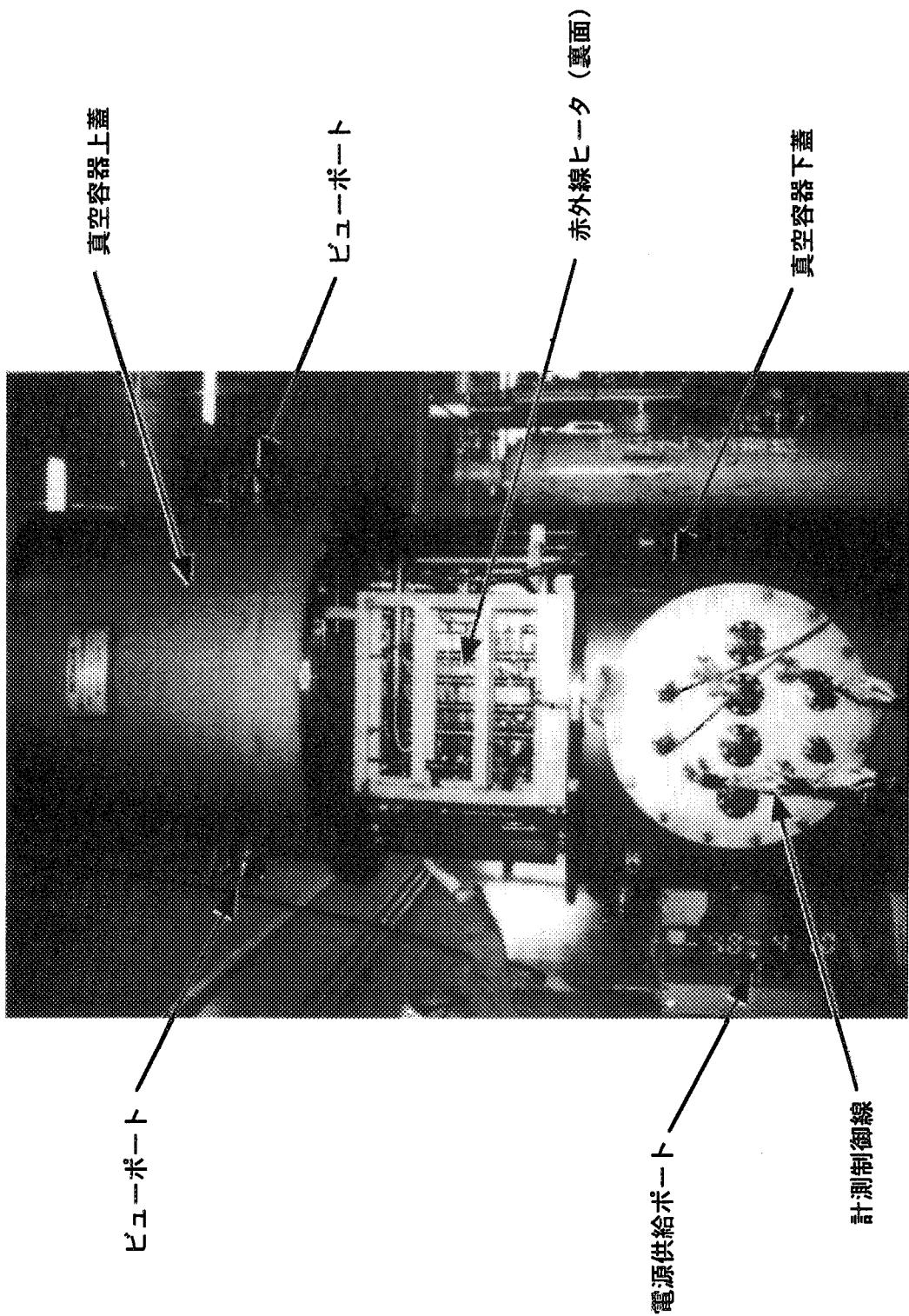


図 8 真空容器の外観

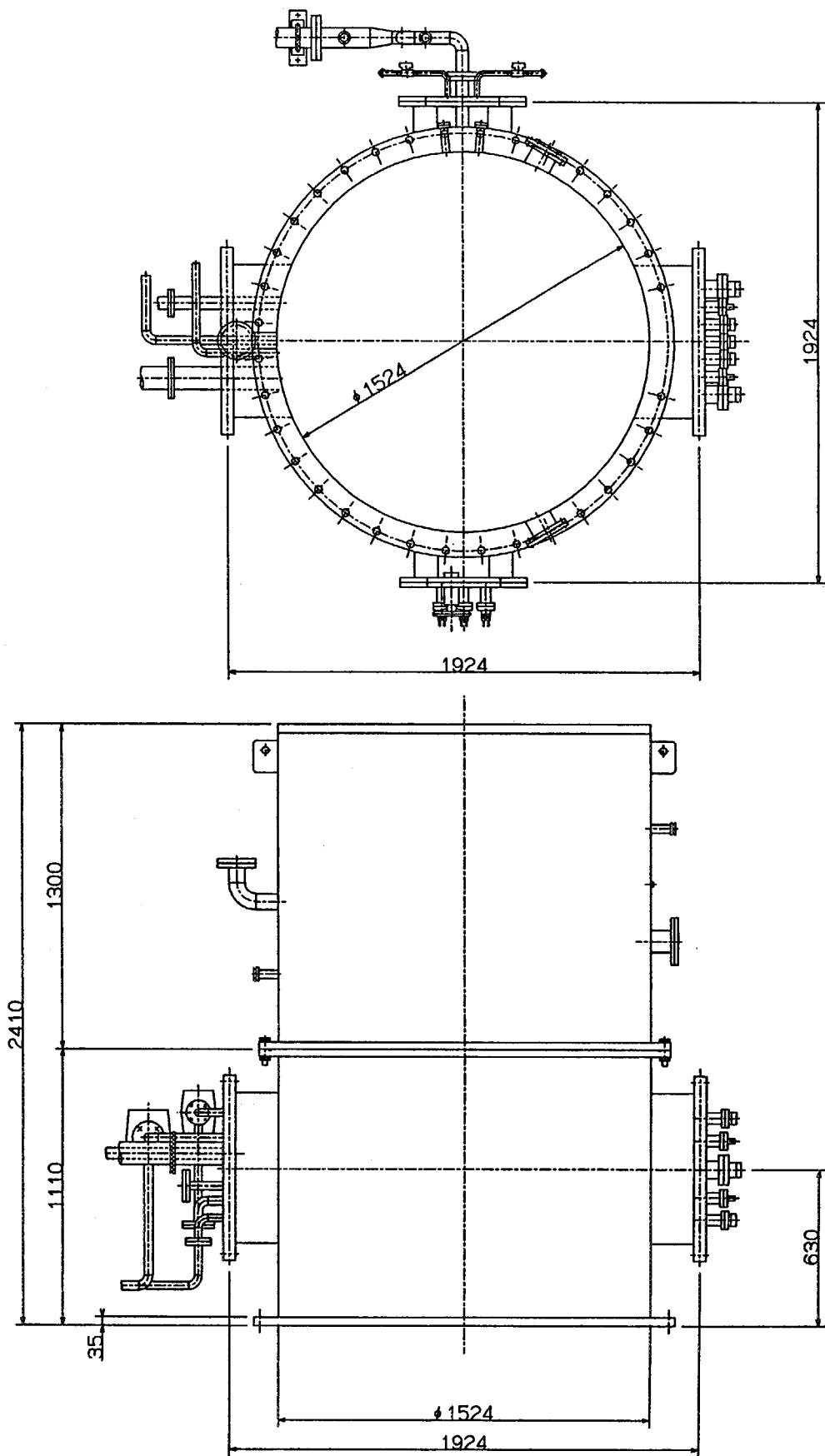


図 9 真空容器概略寸法

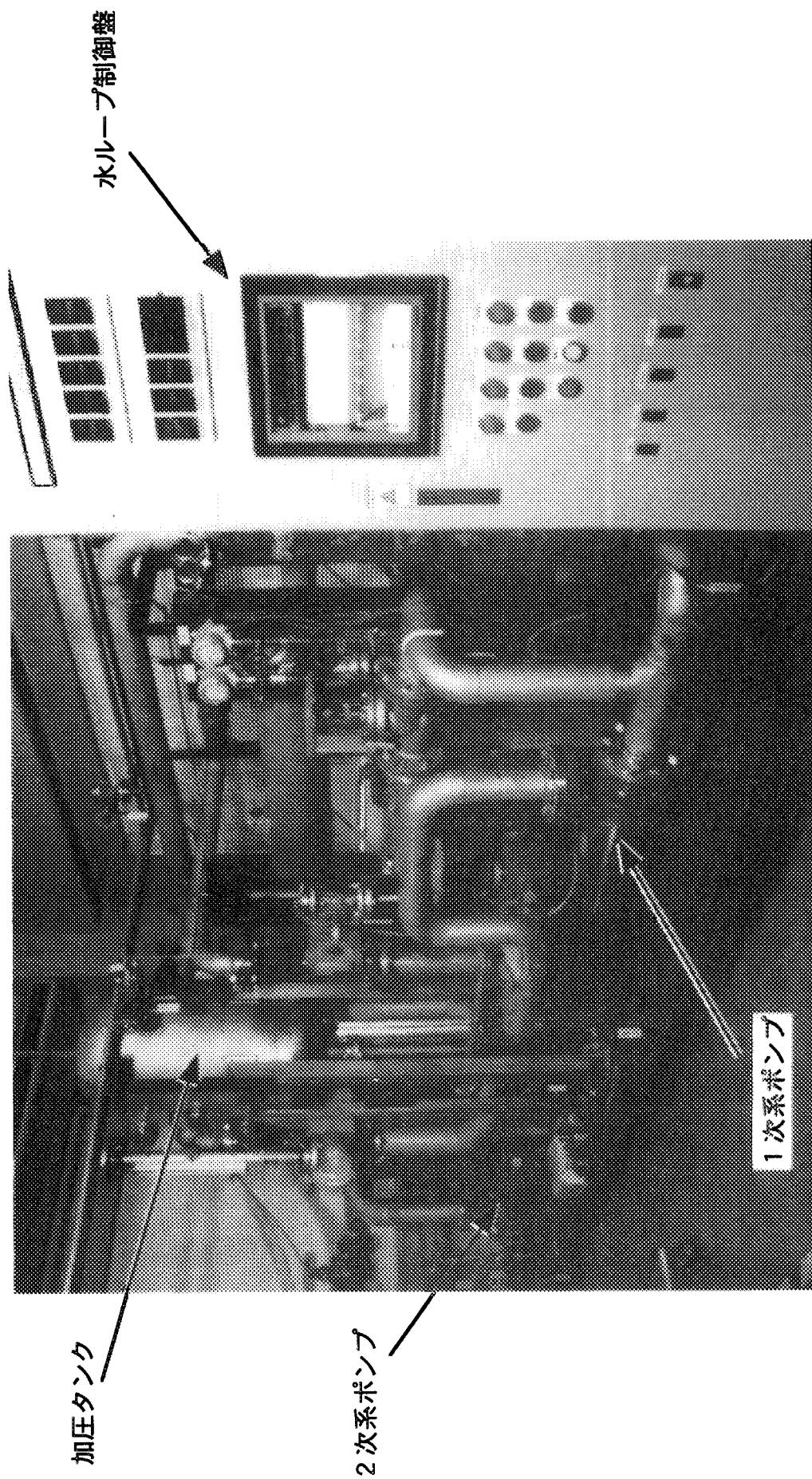


図 10 500kW水ループの外観

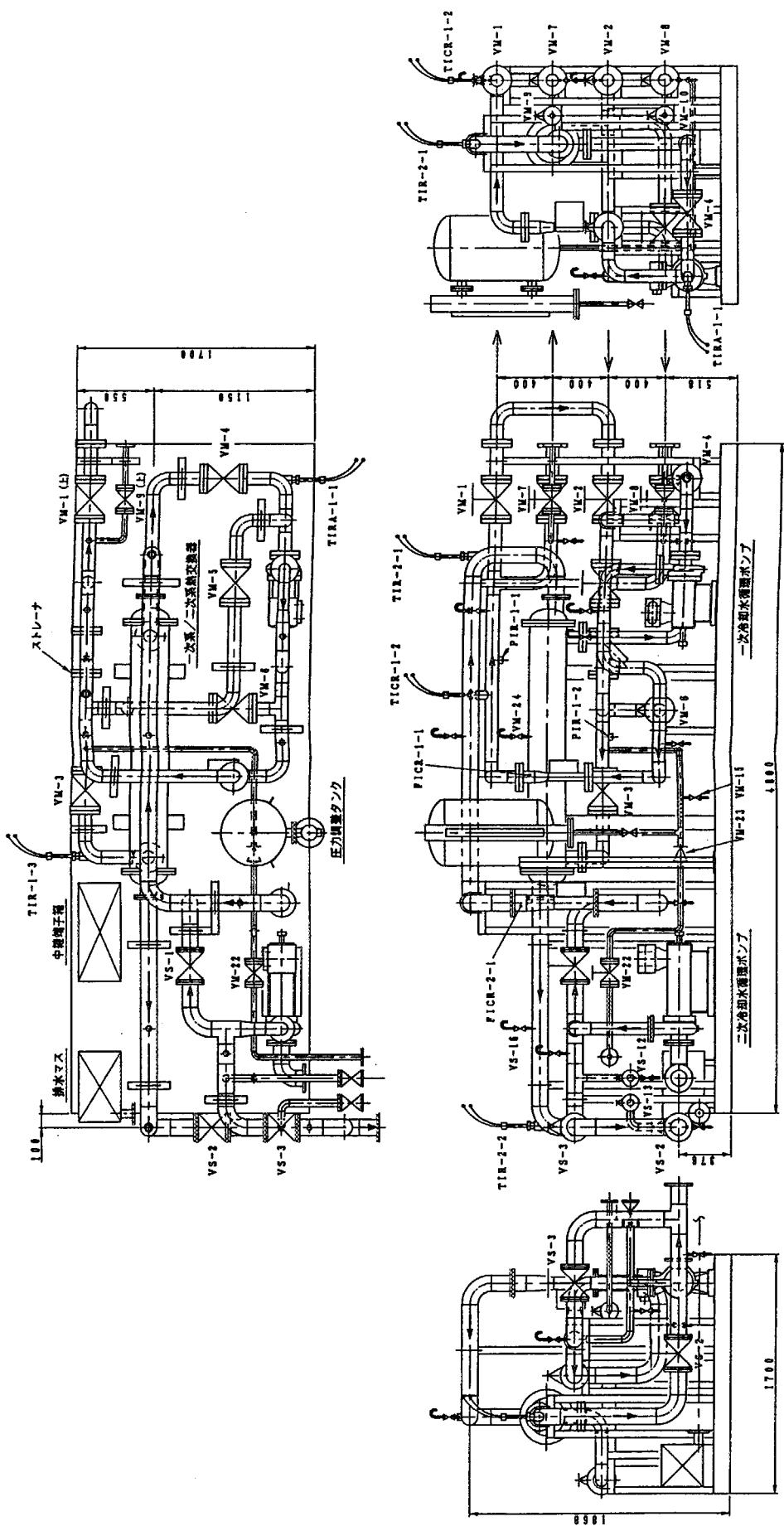


図 1-1 500kW水ループ概略構造

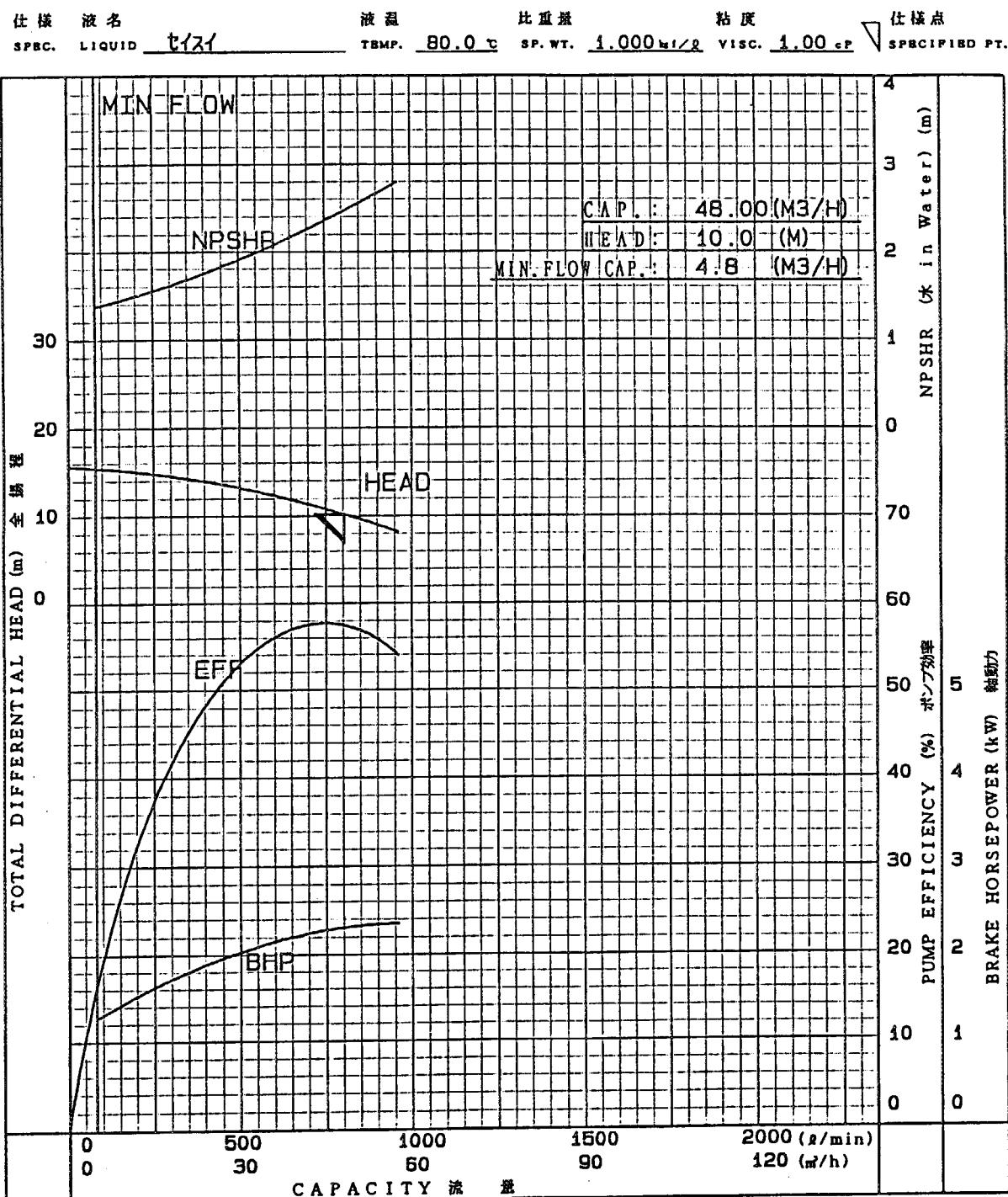


図 12 1次系ポンプ性能曲線

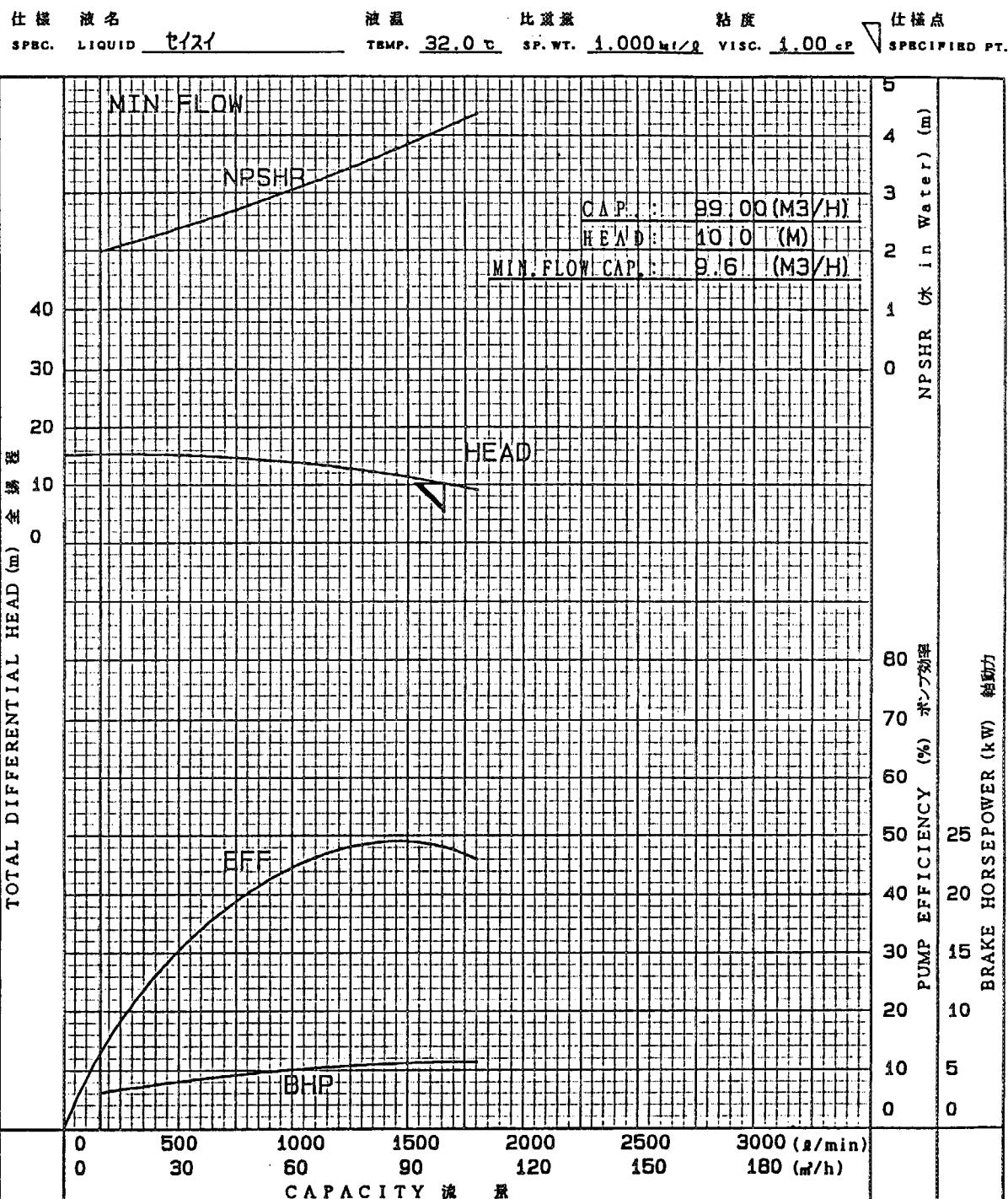
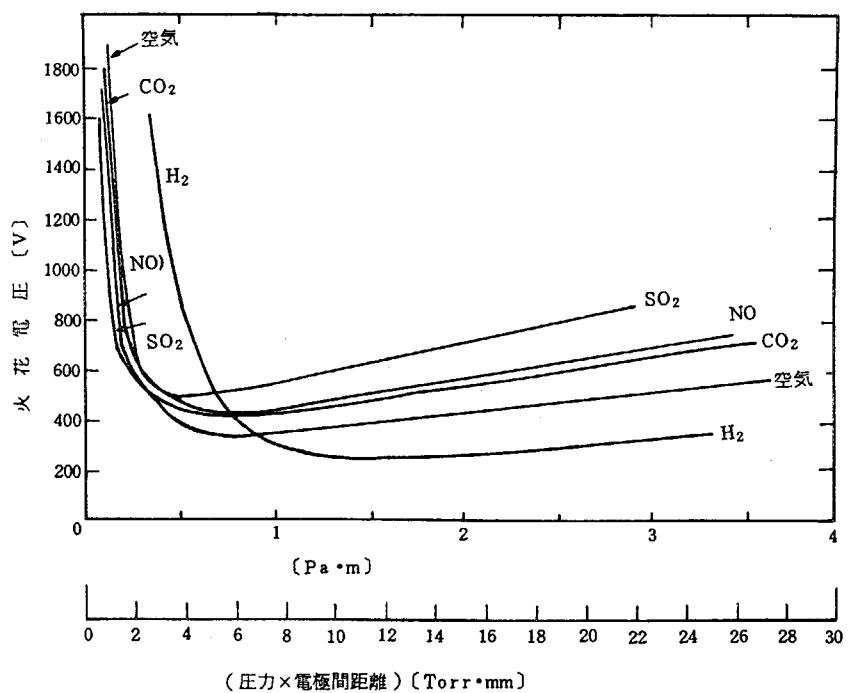


図 13 2次系ポンプ性能曲線



圧力×電極間距離が 0.1~1.4 [Pa·m] 付近の拡大図

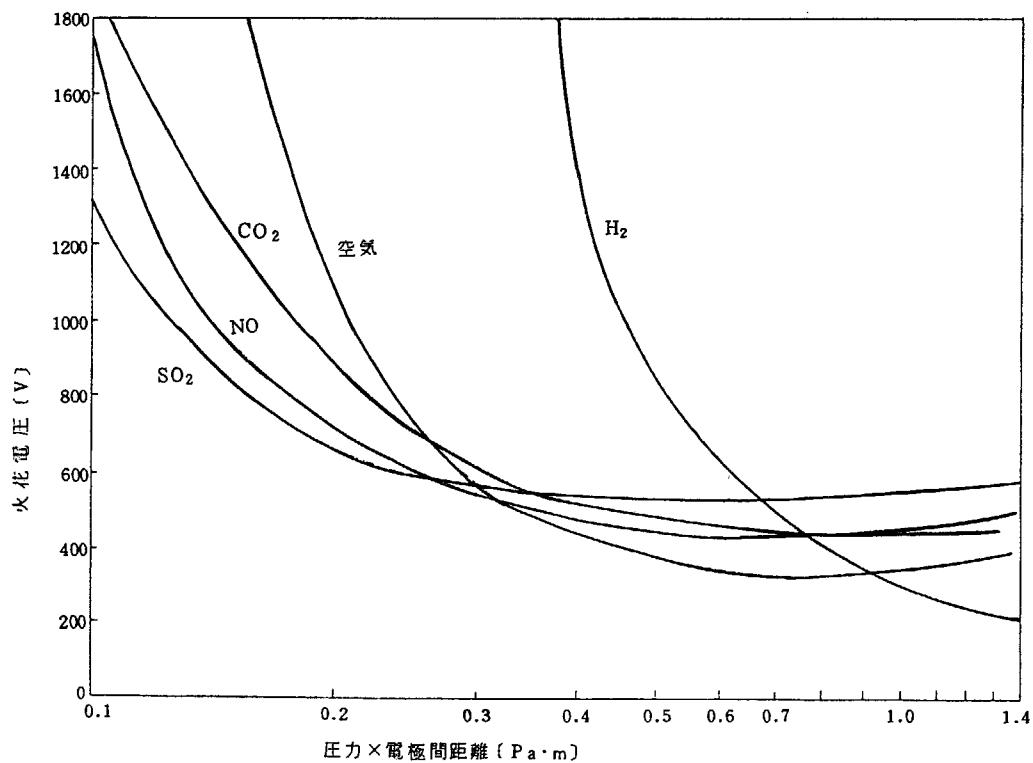


図 14 各周囲雰囲気の圧力と電極間距離の積に対する花火電圧  
(パッシェンの法則)

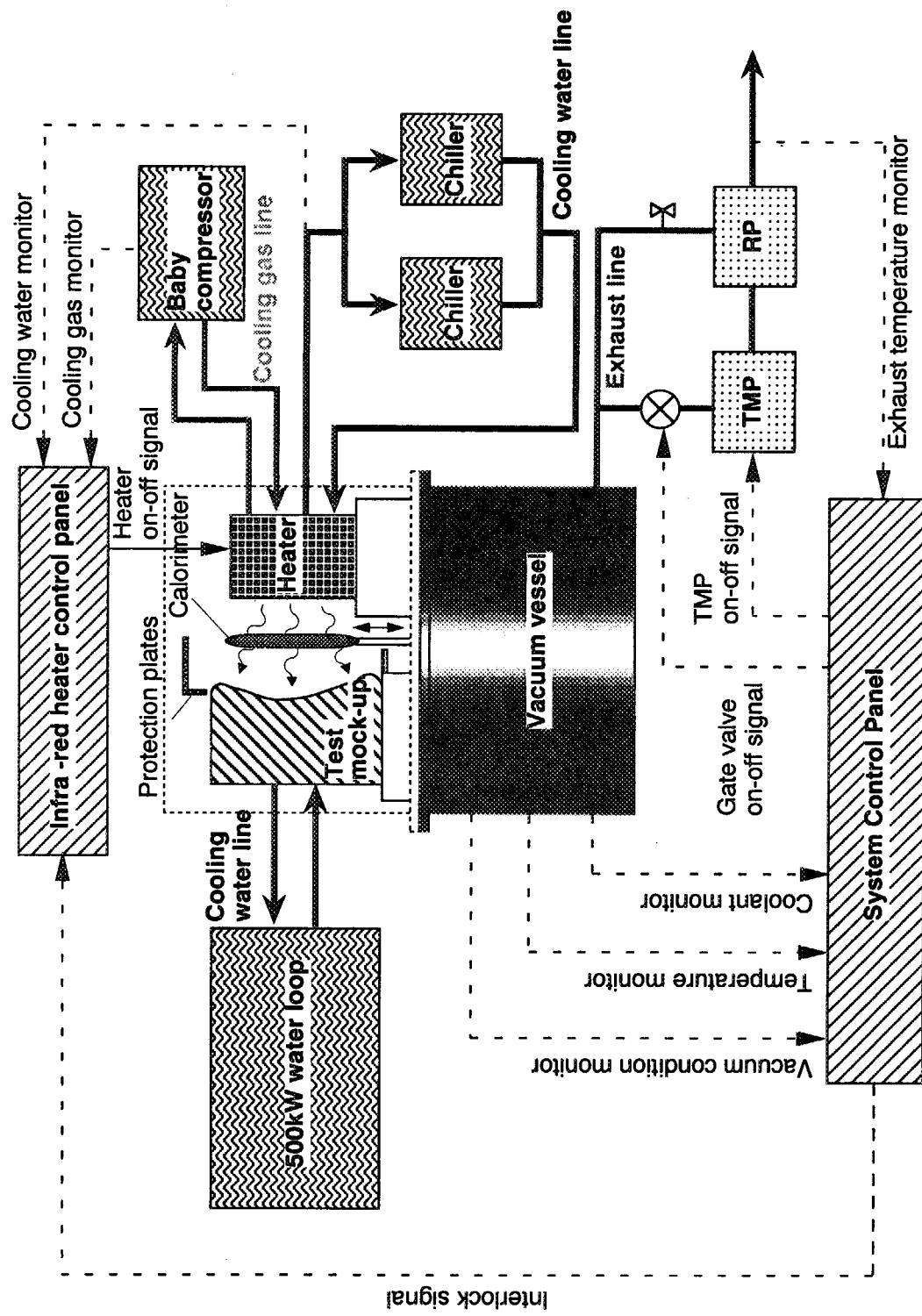


図 1.5 試験設備全体計測制御系統

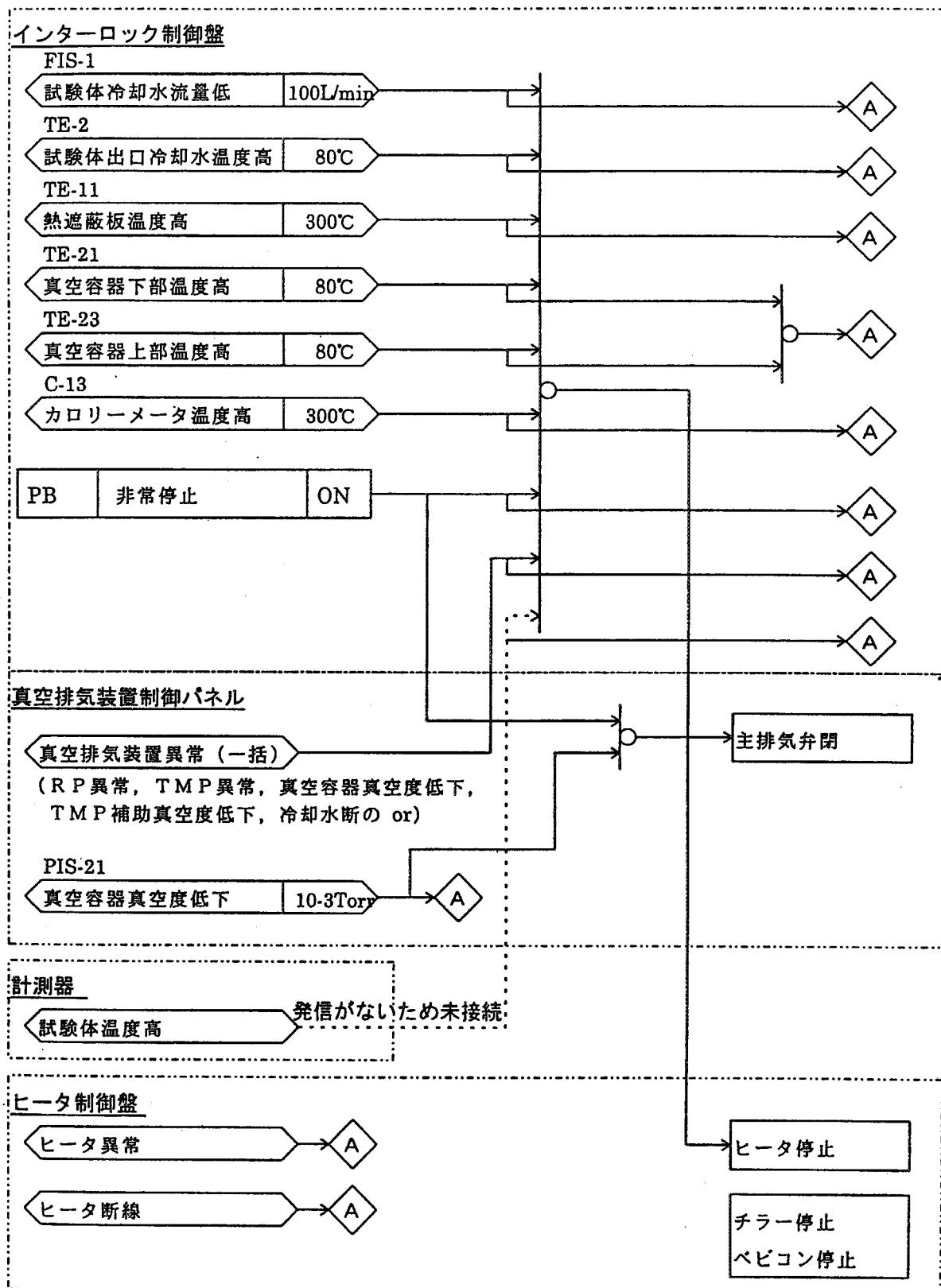


図 16 インターロックブロック線図

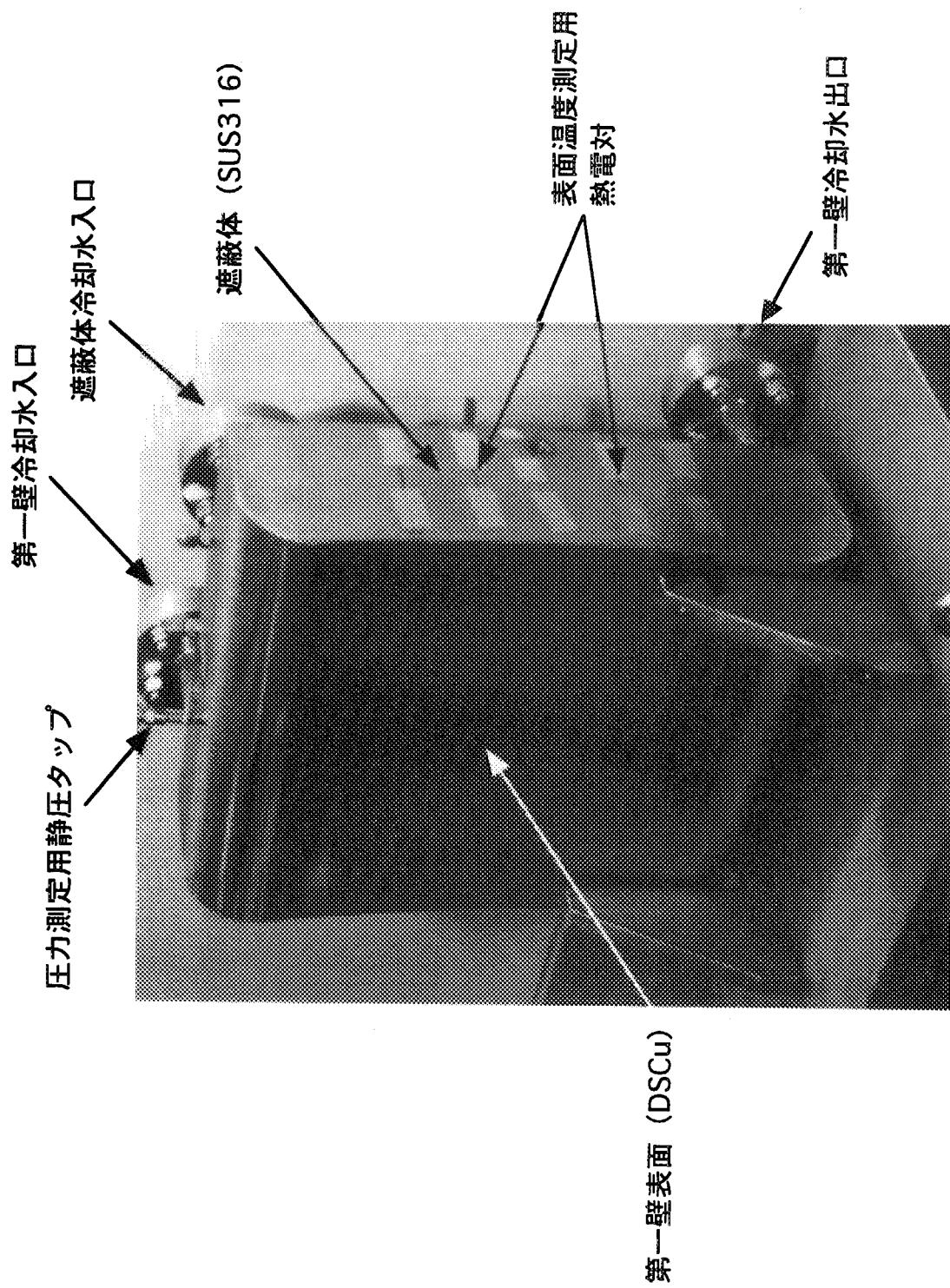


図17 ブランケット小規模モジュール（予備試験体）の外観

## 圖 18 予備試驗体概略構造・寸法

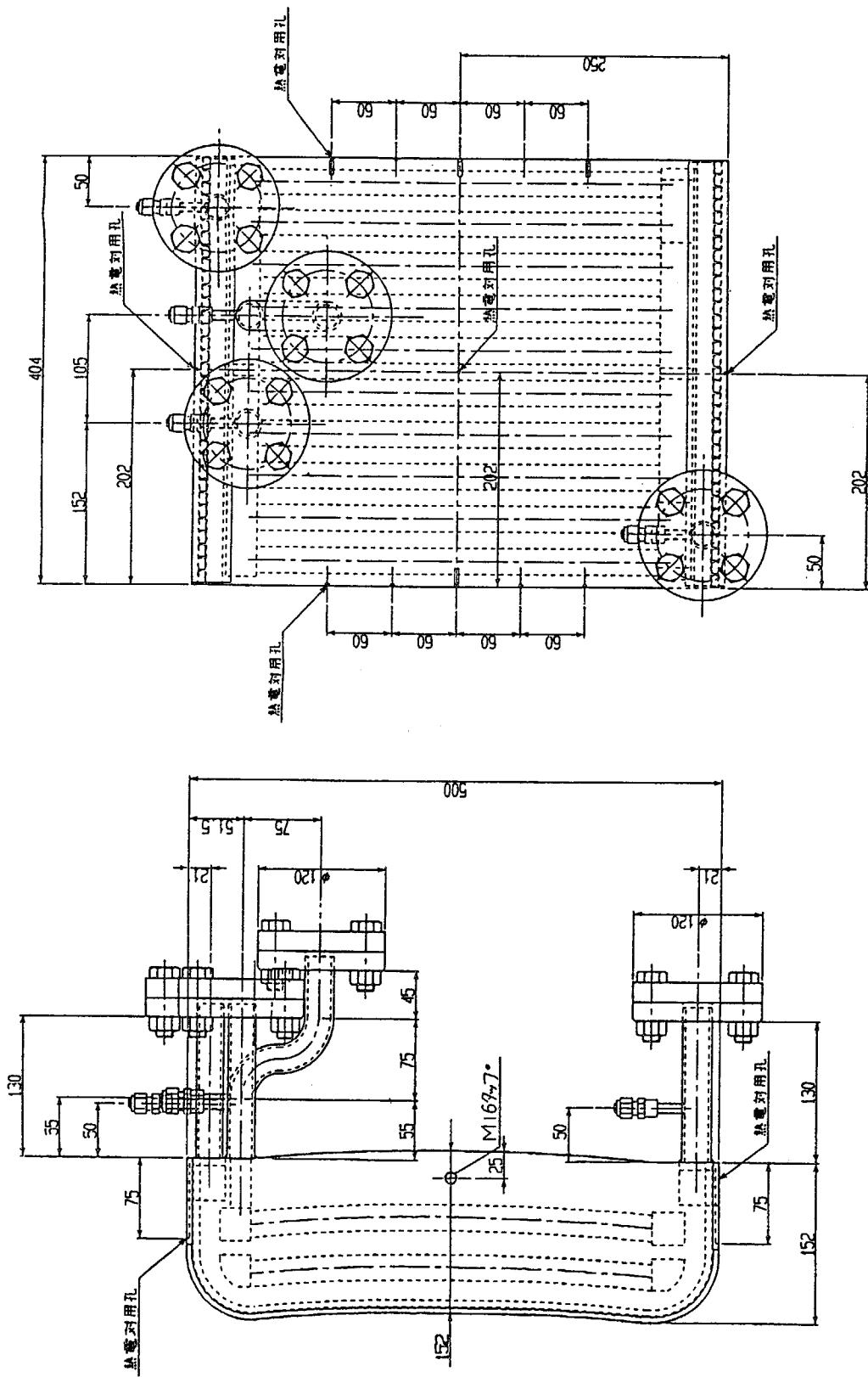
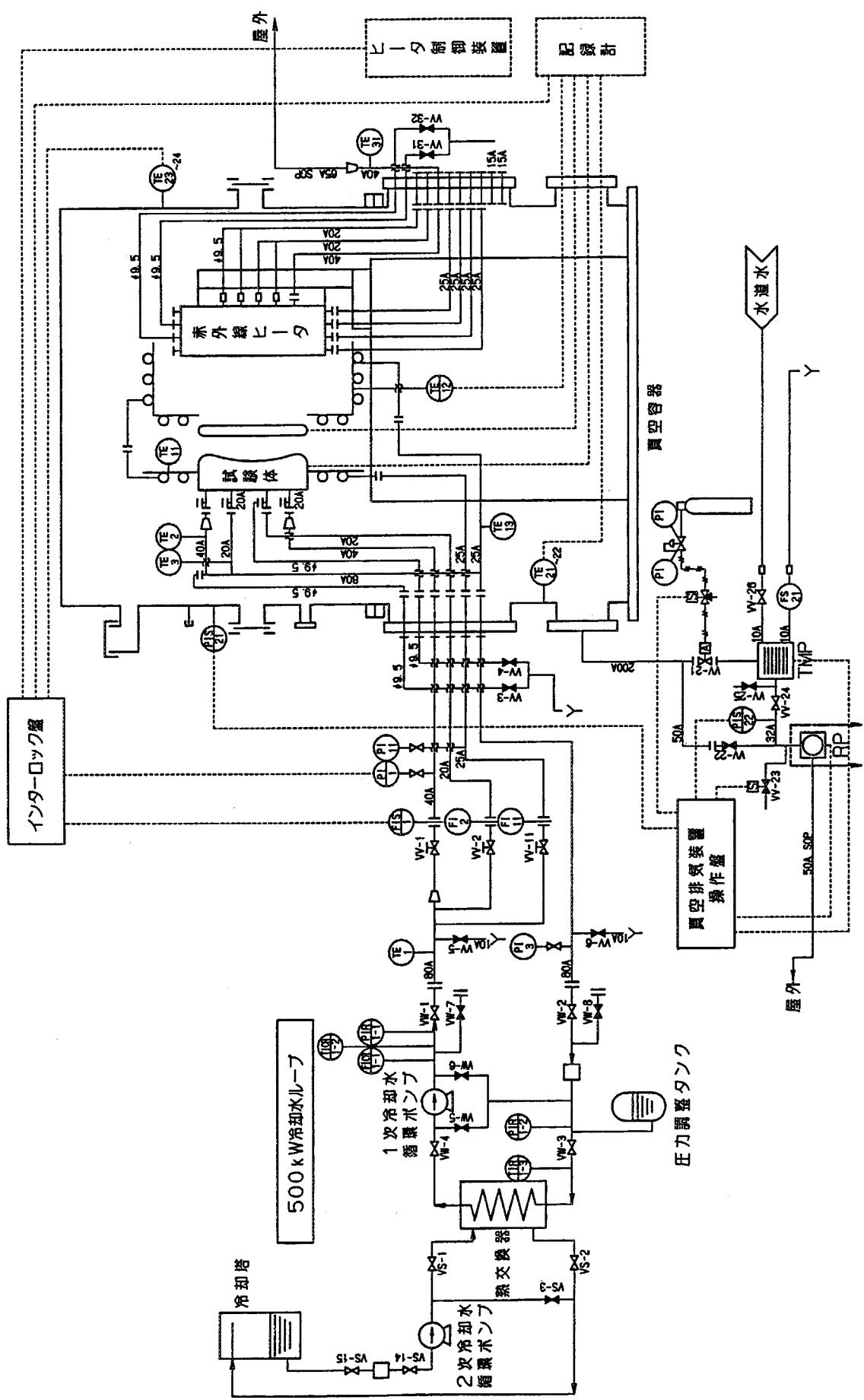
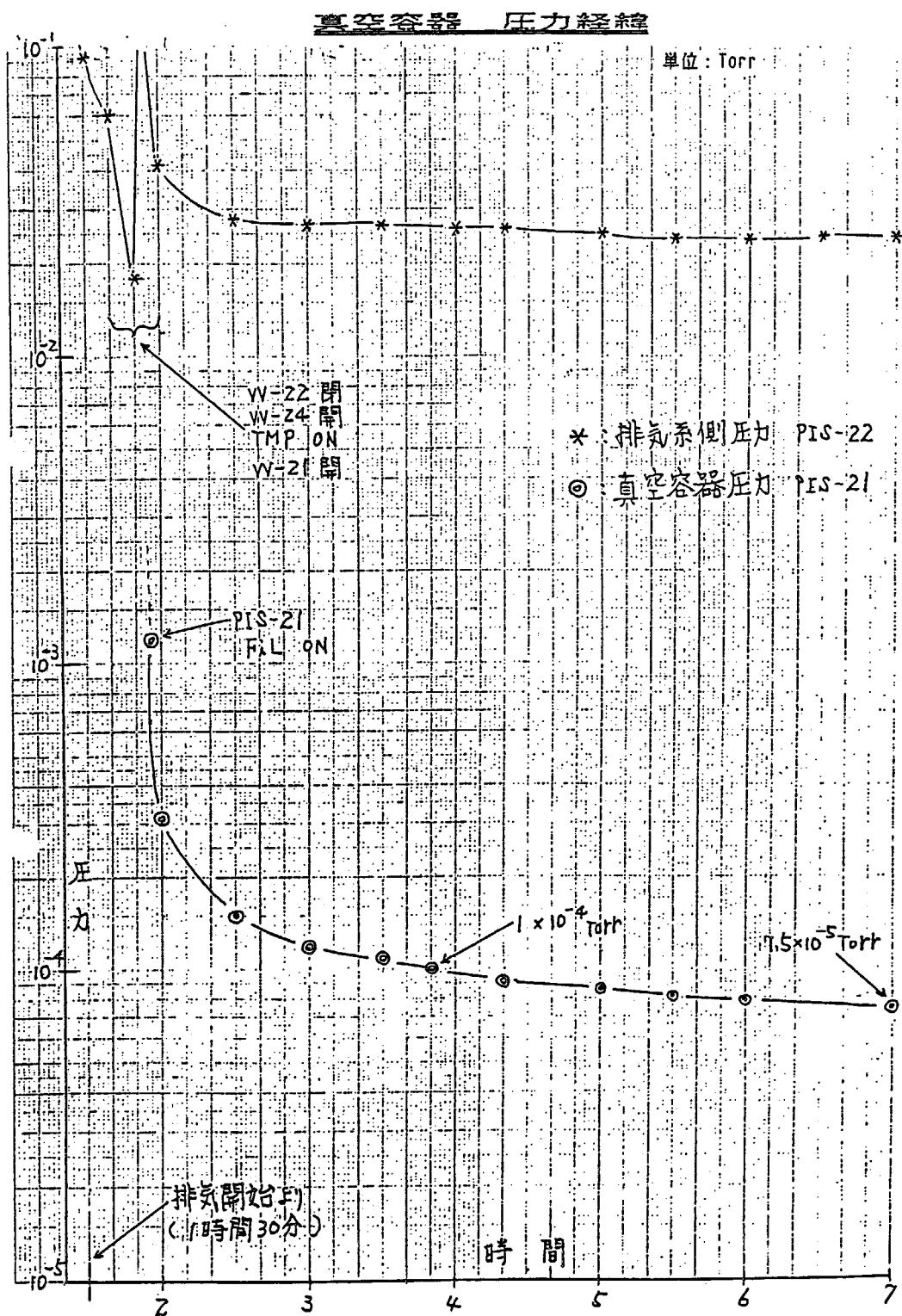


図 19 各データの計測位置





**図 20 真空容器内到達圧力の時間変化  
(非加熱時、初回)**

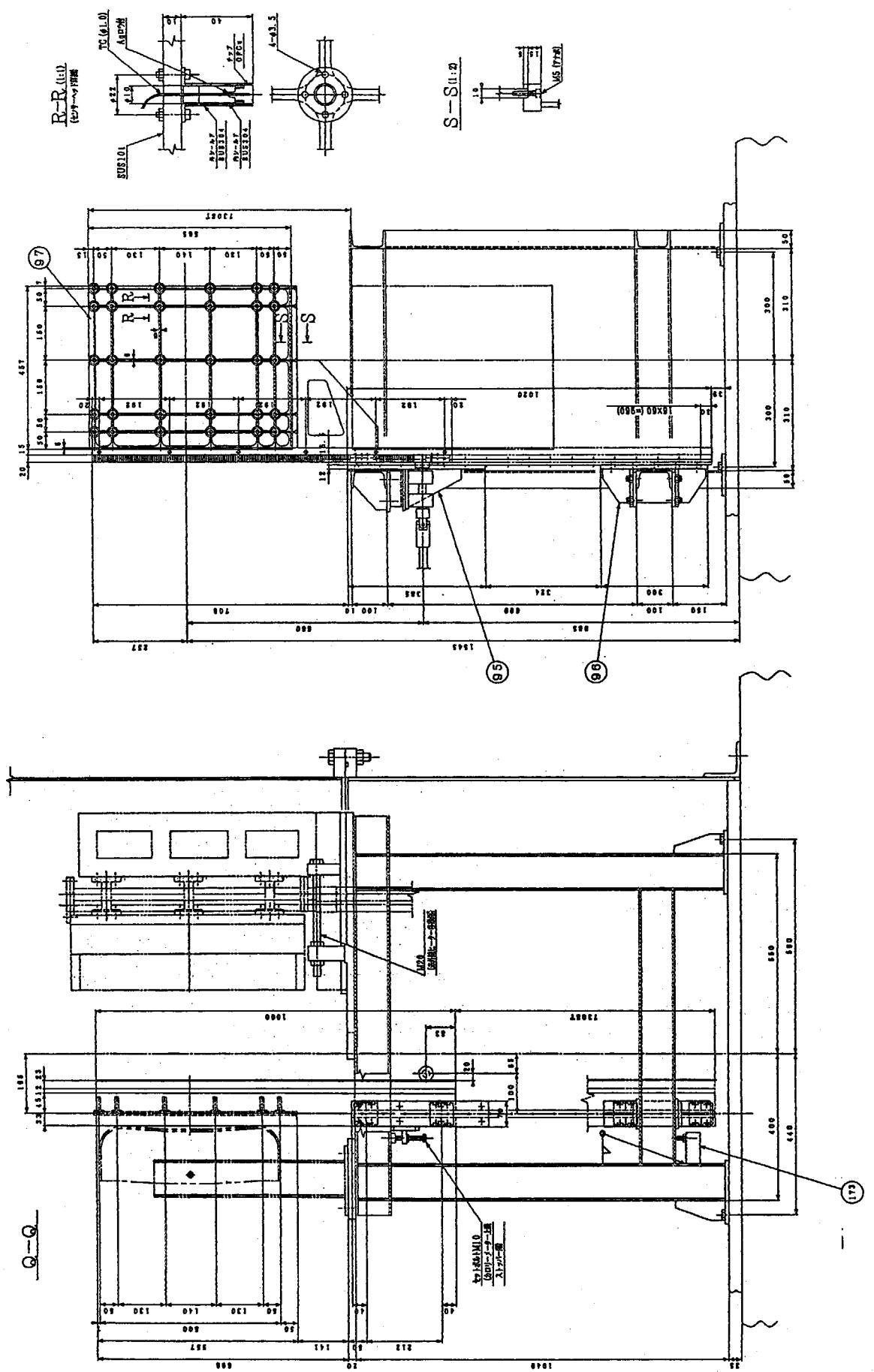


図2-1 力口リメータ取付け位置及び形状寸法

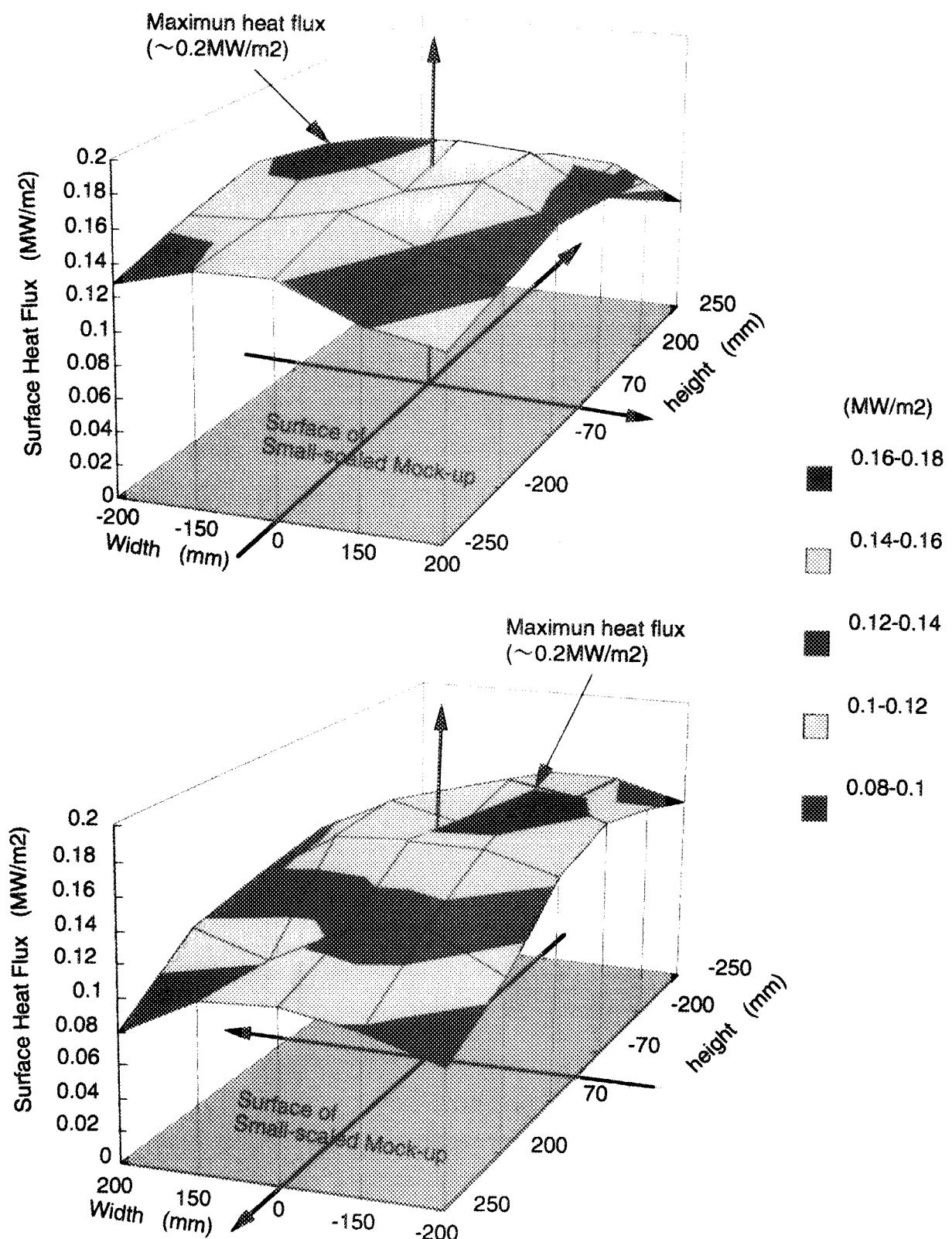


図 2 2 試験体表面熱流束分布

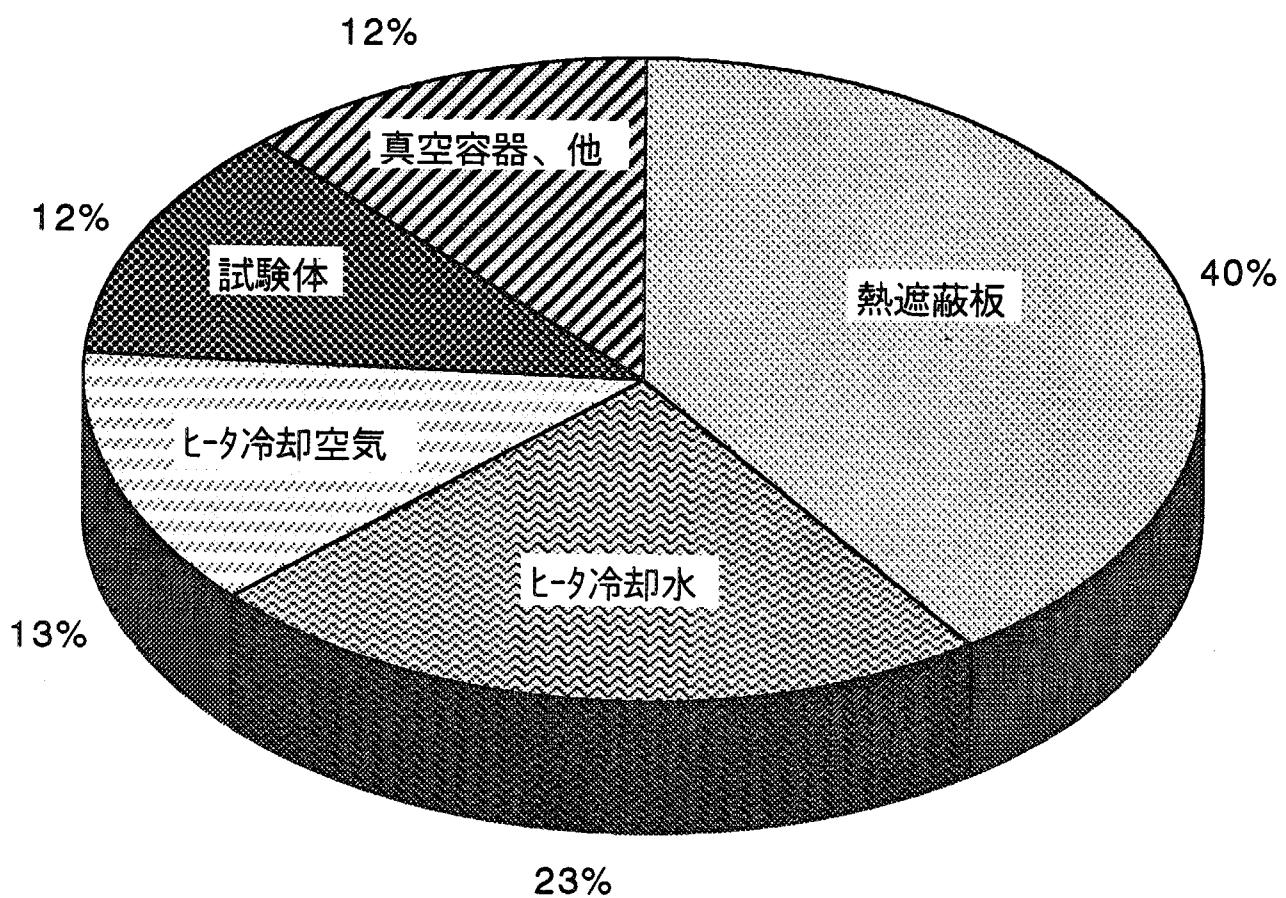
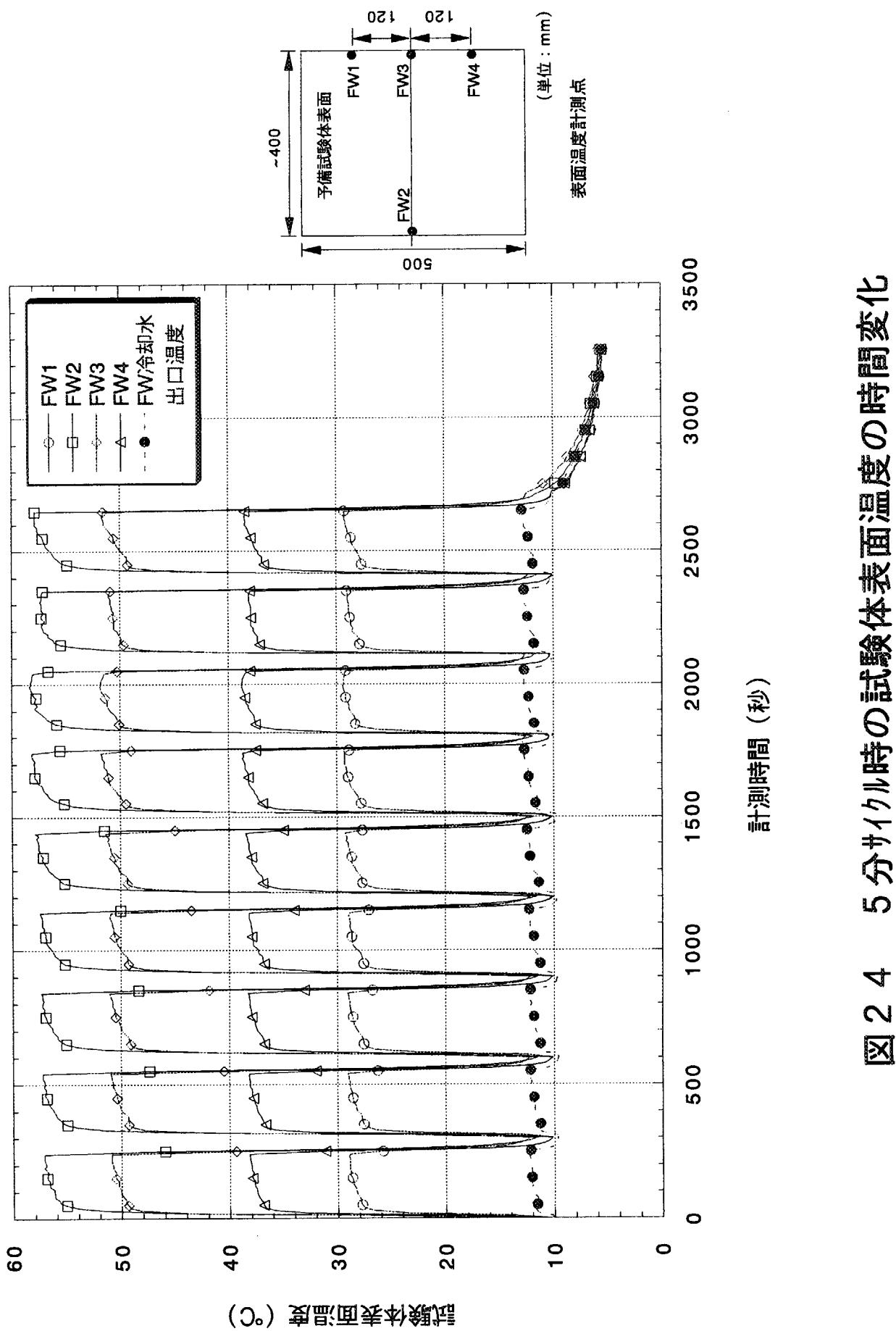


図 23 各機器への入熱の百分率



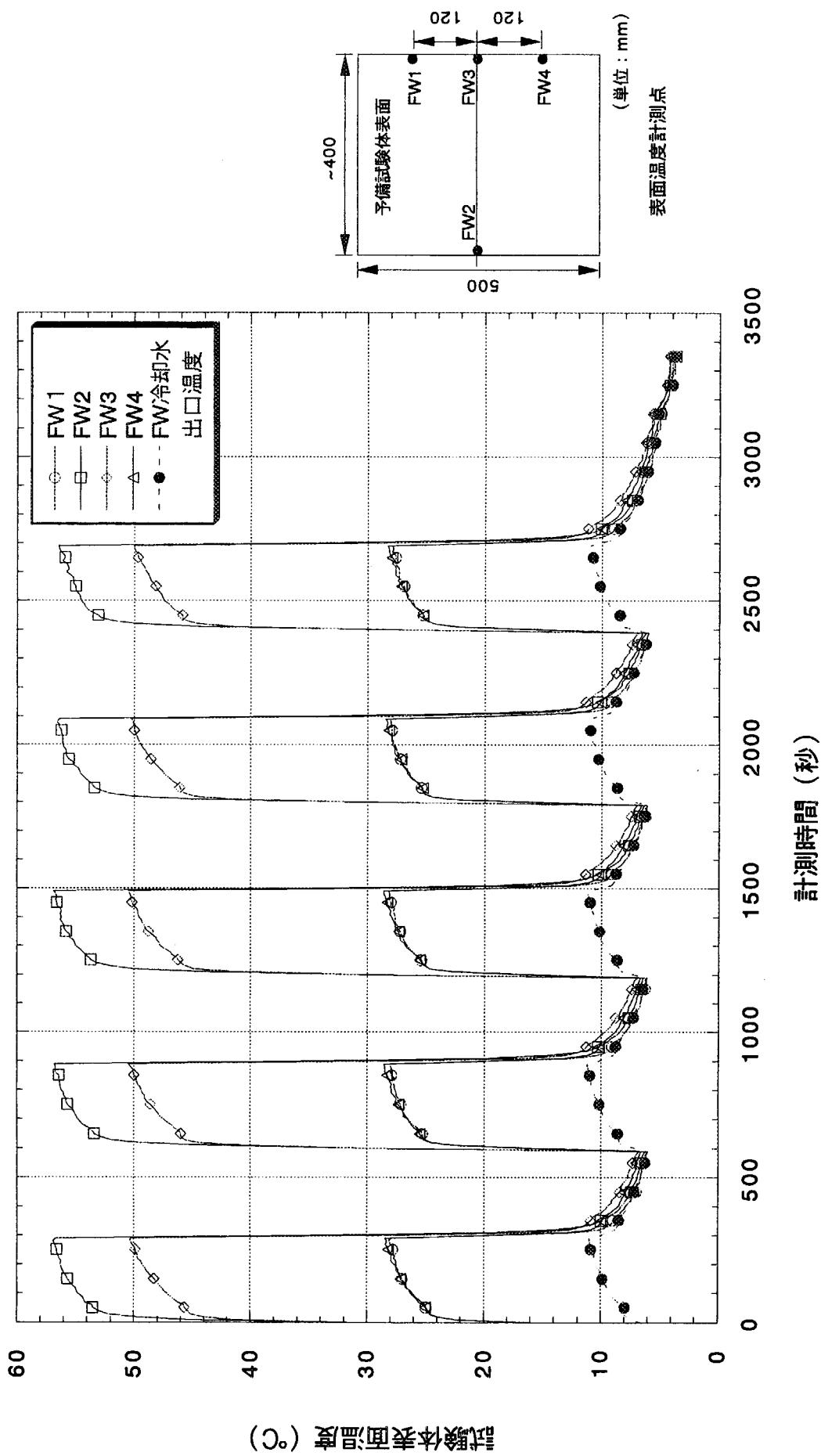


図25 10分サイクル時の試験体表面温度の時間変化

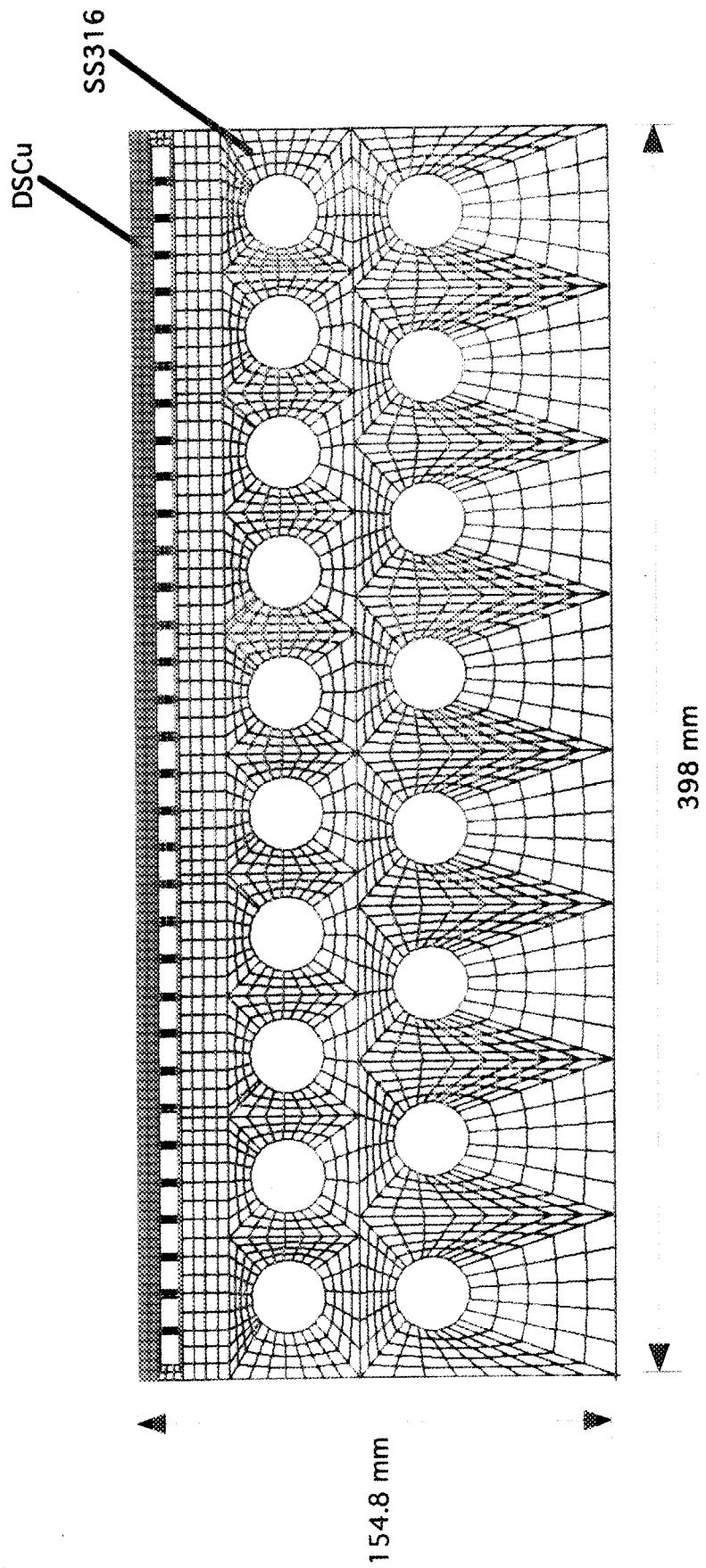


図26 溫度解析モデル形状

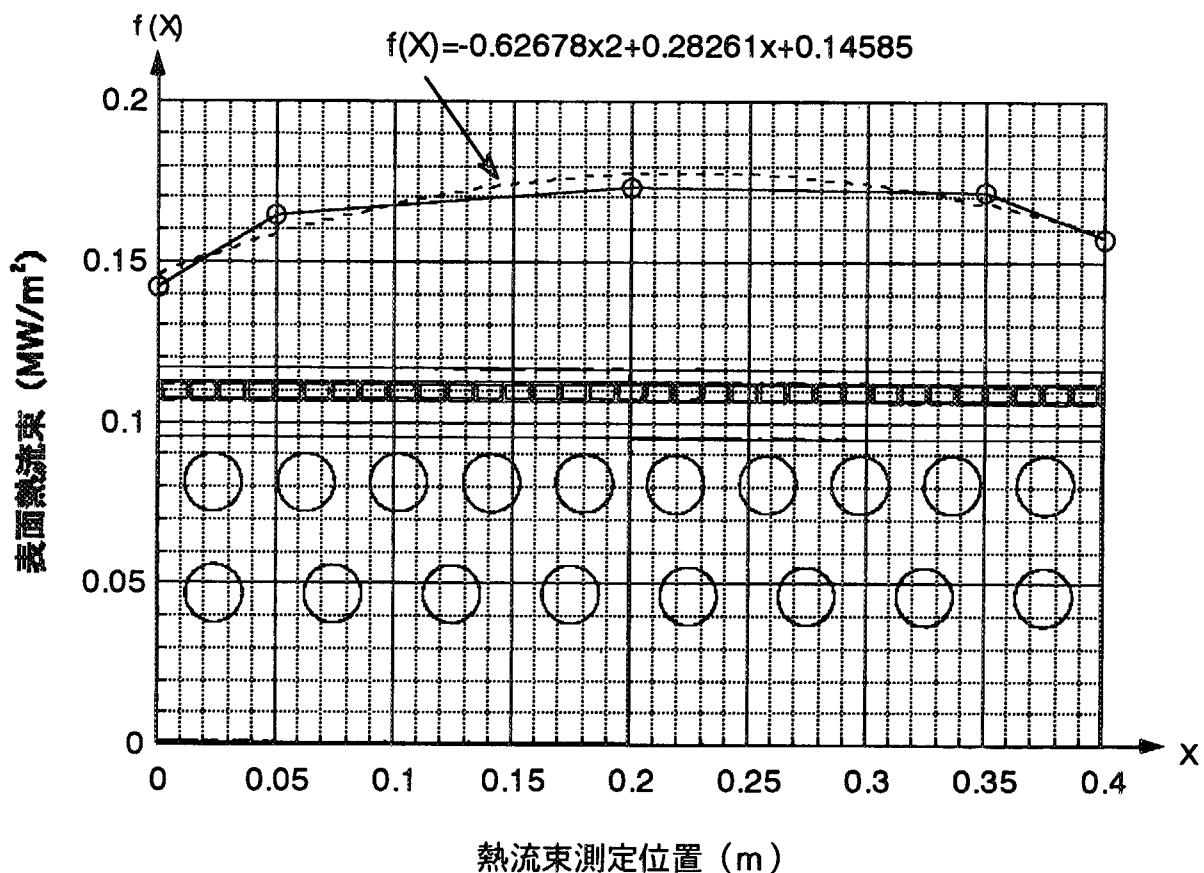
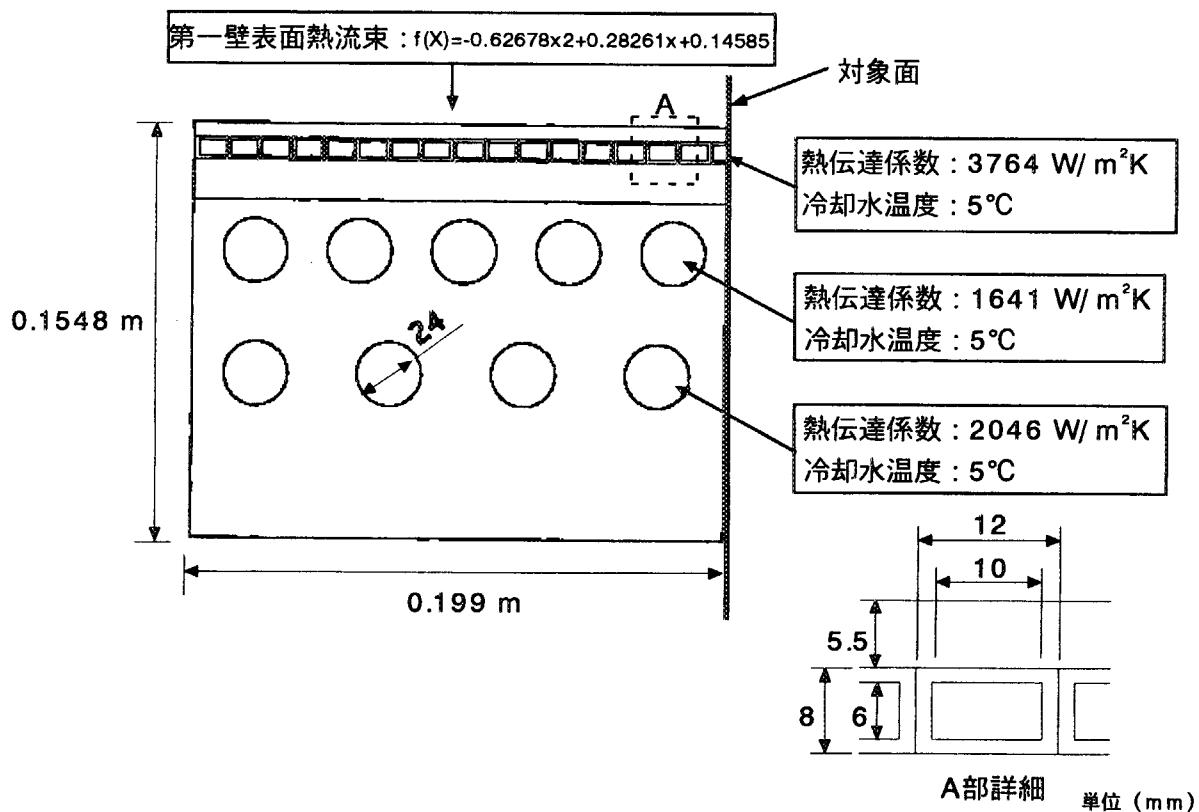


図27 小規模モジュール（予備試験体）温度解析条件

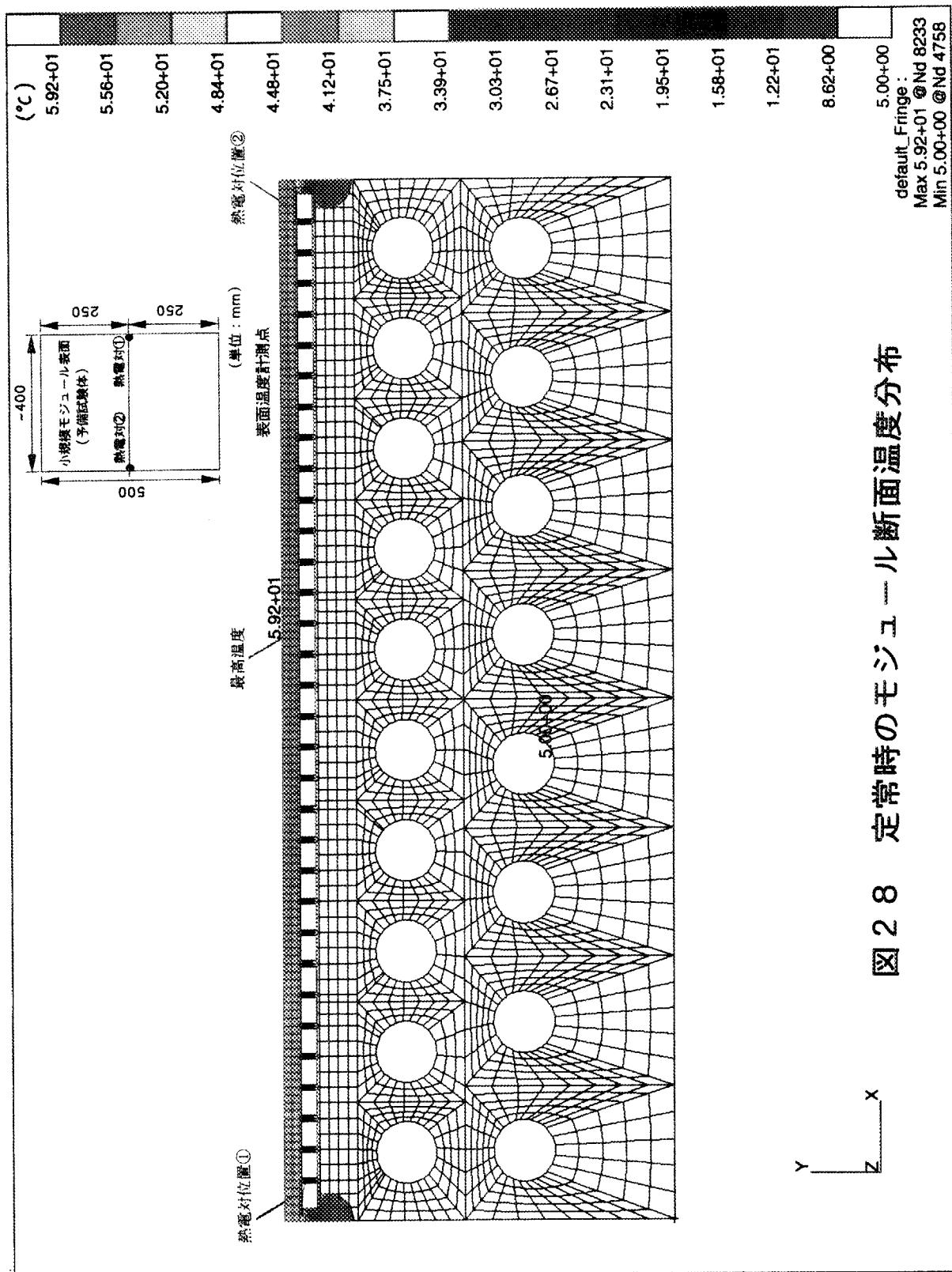


図 2-8 定常時のモジュール断面温度分布

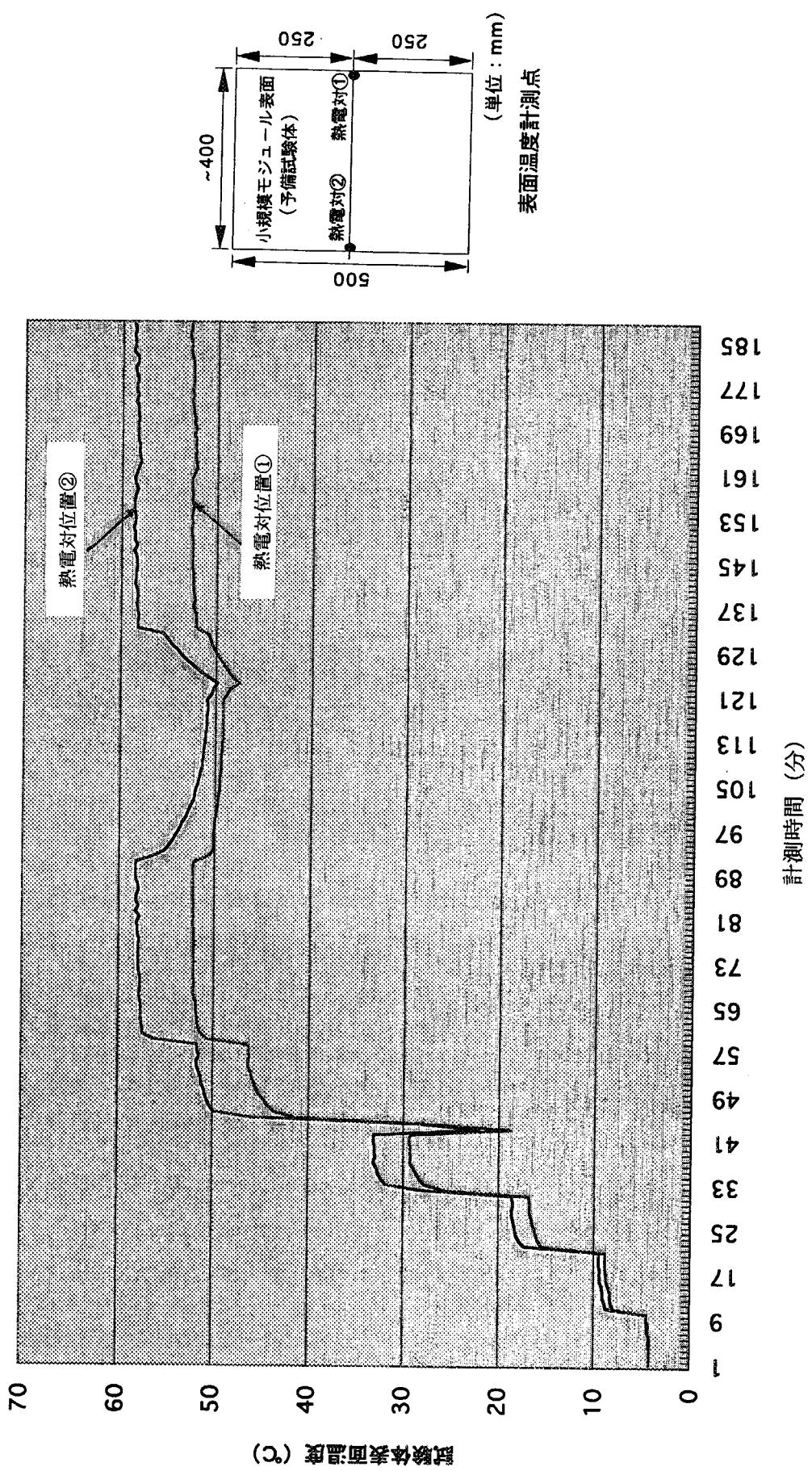


図 29 モジュール中央横断面両端部の熱電対温度応答

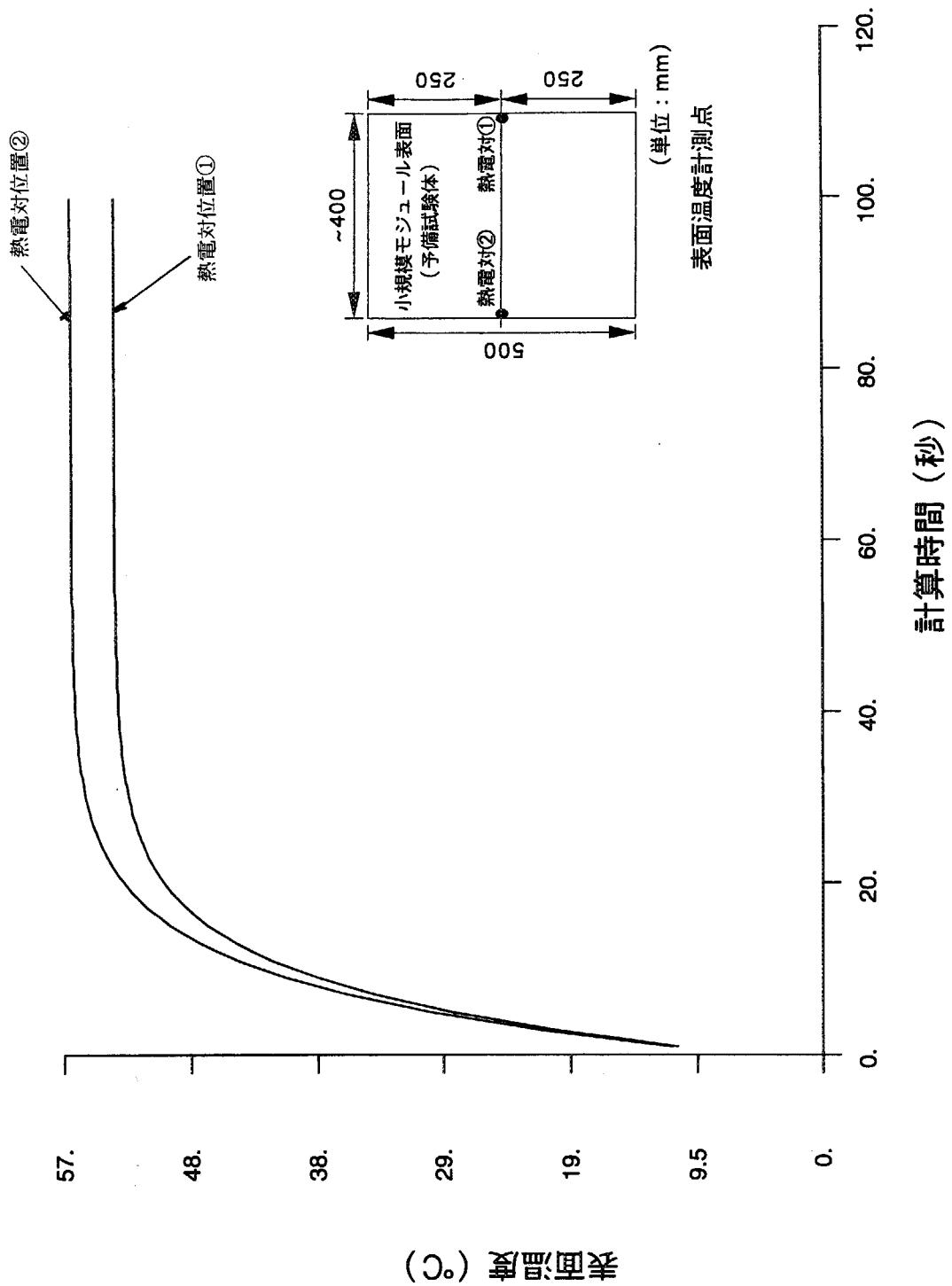


図 30 加熱時ににおける表面温度応答の計算値

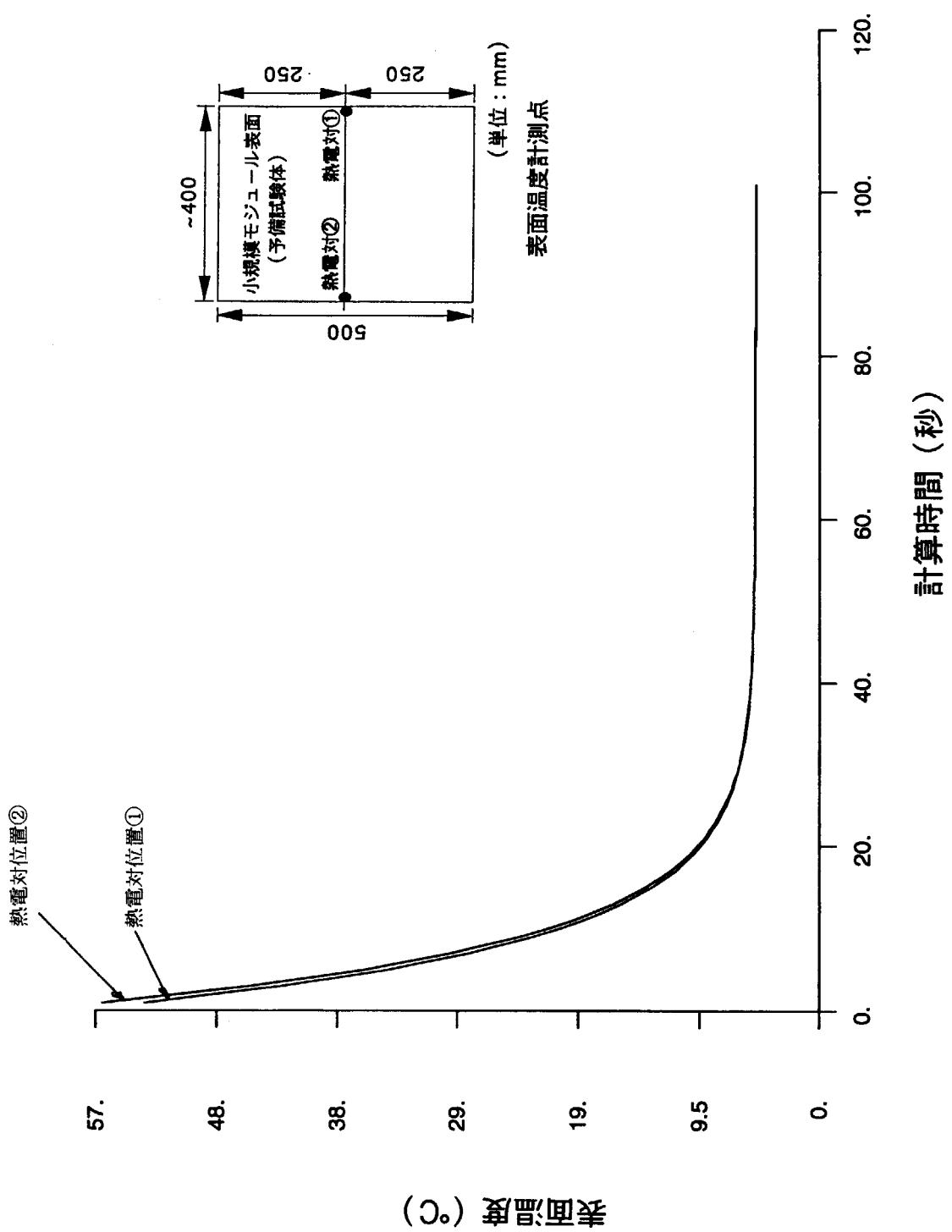


図 3-1 冷却時における表面温度応答の計算値

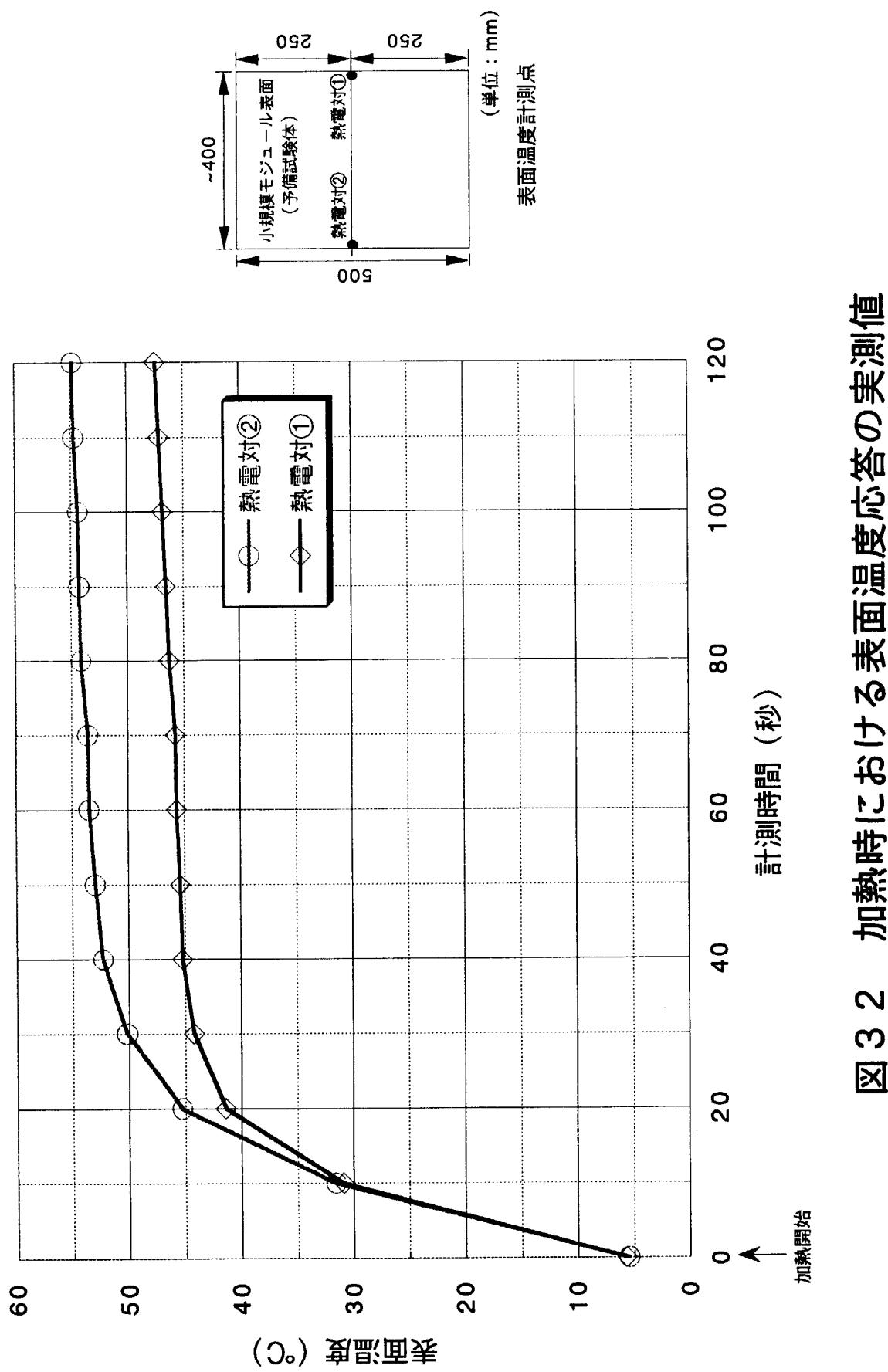


図 3-2 加熱時ににおける表面温度応答の実測値

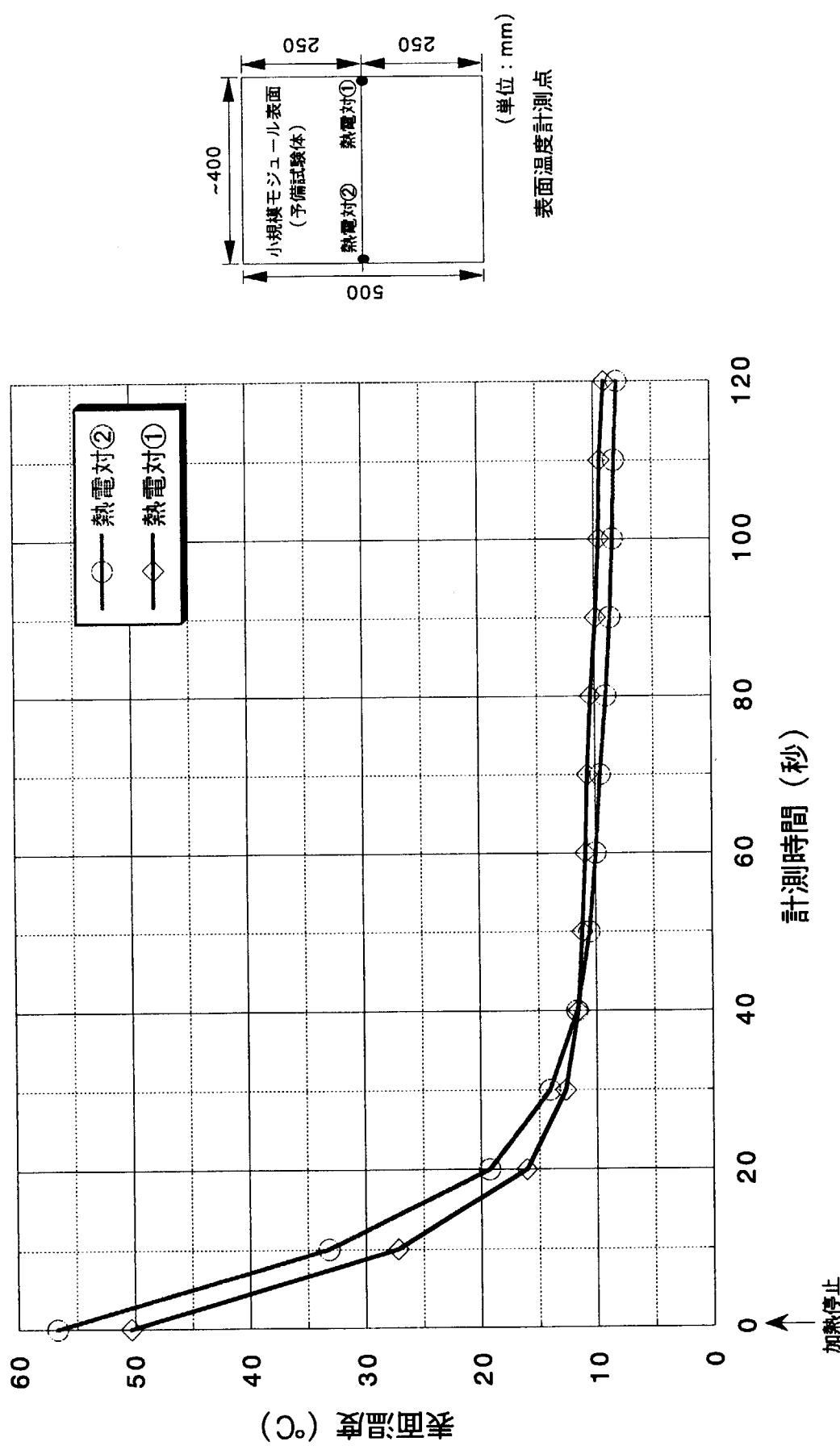


図33 冷却時における表面温度応答の実測値

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーソル	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$	= 4.1855 J(15 °C)
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	= 735.499 W
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1	

放射能	Bq	Ci	Gy	rad
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$	1	100
	$3.7 \times 10^{10}$	1	0.01	1

昭射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

プランケット加熱試験設備の概要と性能試験